CEFET/RJ
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

AVALIAÇÃO DE PARÂMETROS DO PROCESSO DE SOLDAGEM A PONTO POR RESISTÊNCIA PARA A UNIÃO DE CHAPAS DE AÇO “INTERSTITIAL FREE” (IF)

Diego Meireles Lopes

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais, Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca CEFET/RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais.

Orientadores:

Ricardo Alexandre Amar de Aguiar, D.Sc.

Hector Reynaldo Meneses Costa, D.Sc.

Rio de Janeiro
Setembro de 2015

AVALIAÇÃO DE PARÂMETROS DO PROCESSO DE SOLDAGEM A PONTO POR RESISTÊNCIA PARA A UNIÃO DE CHAPAS DE AÇO “INTERSTITIAL FREE” (IF)

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca CEFET/RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais.

Diego Meireles Lopes

Aprovada por:

_____
Presidente, Prof. Ricardo Alexandre A. de Aguiar, D.Sc. (Orientador).

_____
Prof. Hector Reynaldo Meneses Costa, D.Sc. (Coorientador).

_____
Prof. Jorge Carlos Ferreira Jorge, D.Sc.

_____
Prof. Leonardo Sales Araújo, D.Sc. (COPPE - UFRJ).

Rio de Janeiro
Setembro de 2015

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

L864 Lopes, Diego Meireles
Avaliação de parâmetros do processo de soldagem a ponto por resistência para a união de chapas de aço “Interstitial Free” (IF) / Diego Meireles Lopes. 2015.
xv, 74f. : il. (algumas color.) , grafs. , tabs. ; enc.

Dissertação (Mestrado) Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca , 2015.
Bibliografia : f.70-7 4
Orientadores: Ricardo Alexandre Amar de Aguiar
Hector Reynaldo Meneses Costa

1. Soldagem elétrica. 2. Solda e Soldagem. 3. Engenharia Mecânica. 4. Chapas de Aço. I. Aguiar, Ricardo Alexandre Amar de (Orient.). II. Costa, Hector Reynaldo Meneses (Orient.). III. Título.

CDD 671.521

"Tenha sempre como meta muita força, muita determinação e sempre faça tudo com muito amor e com muita fé em Deus, que um dia você chega lá. De alguma maneira você chega lá."
Ayrton Senna da Silva *(1960-1994)*

À Nossa Senhora de Fátima;

Aos meus pais e familiares;

À minha amada esposa.

AGRADECIMENTOS

▪ Ao Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca - CEFET/RJ, por transformar a minha vida acadêmica, desde o início do curso técnico em Automobilística, depois ao longo da graduação em Engenharia Mecânica e agora na conclusão do mestrado, garantindo assim a continuidade da minha formação ao longo destes muitos anos de lutas e muita dedicação.

▪ Ao meu orientador, professor Ricardo Alexandre de Amar Aguiar, ao meu coorientador, professor Hector Reynaldo Meneses Costa, ambos integrantes do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais – PPEMM, do CEFET/RJ, pela grande amizade, confiança, dedicação e orientação ao longo destes últimos anos para elaboração desta dissertação de mestrado.

▪ Ao pessoal da secretaria do Programa de Pós-Graduação, em especial ao servidor Bráulio T. Santos e ao corpo docente do curso de mestrado em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais - PPEMM do CEFET/RJ, em especial aos professores Silvio de Barros, Gilberto A. C. Branco, Jorge C.F. Jorge, Luís Felipe G. Souza e Maurício S. Motta por colaborarem com a evolução da minha formação em nível de pós-graduação.

▪ Ao professor Joanes Silva Dias, da unidade Itaguaí do CEFET/RJ, pelo apoio técnico ao longo da realização deste trabalho de dissertação.

▪ Ao engenheiro Marcio Luiz Almeida Cunha, da Gerência Geral de Desenvolvimento de Produtos da Companhia Siderúrgica Nacional - CSN, pela amizade e pelo apoio técnico para a realização deste trabalho.

▪ Aos servidores Brenno Duarte e Hiron Akira pelo apoio técnico, no Laboratório de Ensaios de Materiais – LAMAT e no Laboratório de Compósitos e Adesivos - LADES do CEFET/RJ.

▪ Aos professores do curso técnico em Manutenção Automotiva do CEFET/RJ, campus Maria da Graça, em especial ao eterno, Professor Washington da Costa (*in memorian*), pela amizade e pelo apoio irrestrito para a realização deste trabalho.

▪ Aos meus maravilhosos pais, pelo esforço em minha educação, pelo carinho da minha querida irmã, pela dedicação da minha linda esposa, pela amizade de todos os familiares e grandes amigos, que mesmo distantes torcem muito para a realização deste trabalho.

▪ Aos servidores Drª Valéria Said de Barros Pimentel, Engº Fernando Risso A. Ferreira e aos demais amigos da Divisão de Engenharia de Avaliações e de Produção – DEAP, do Instituto Nacional de Tecnologia – INT, do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação – MCTI.

▪ Aos servidores e bolsistas do Centro de Caracterização em Nanotecnologia para Materiais e Catálise – CENANO, do Instituto Nacional de Tecnologia – INT, do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação – MCTI, em especial ao Doutor Cássio Barbosa e as bolsistas Rachel Pereira Carneiro da Cunha e Olivia Cypreste Pereira.

▪ Aos meus colegas do curso de Mestrado em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais do CEFET/RJ, em especial aos amigos Alencar José Bernardino, Bruno Lobão, Bruno Cavalcante, Guilherme Souza, Leandro Vianna e Rodolpho da Hora pelo apoio em todas as horas mais difíceis desde os tempos de graduação.

▪ Aos grandes amigos, Filipe Magdalena, Humberto Terço, Vinícius Ferreira, ambos alunos do curso de graduação em Engenharia Mecânica do CEFET/RJ, pela amizade sincera e o apoio técnico para a realização deste trabalho de pós-graduação.

▪ Aos meus colegas de trabalho no Sistema FIRJAN, em especial aos professores do Curso Técnico em Manutenção Automotiva do SENAI - UNOP Tijuca, pelo incentivo e contribuição na minha carreira de docente.

▪ Aos meus colegas e aos professores do Curso Engenharia Legal, Avaliações e Perícias Judiciais, da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro - PUC-Rio, em especial ao Professor Eng. Sérgio Abunahman pela contribuição na minha carreira profissional.

RESUMO

AVALIAÇÃO DE PARÂMETROS DO PROCESSO DE SOLDAGEM A PONTO POR RESISTÊNCIA PARA A UNIÃO DE CHAPAS DE AÇO “INTERSTITIAL FREE” (IF)

Diego Meireles Lopes

Orientador:
Ricardo Alexandre de Amar Aguiar

Resumo da Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca – CEFET/RJ como parte dos requisitos necessários para obtenção do titulo de mestre em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais.

Essa dissertação teve como objetivo realizar a avaliação de uma gama de parâmetros de soldagem, permitindo a seleção da melhor combinação desses parâmetros e verificar a redução da espessura da camada de Zinco, com revestimento nominal 60 *g/m²*, em uma junta soldada através do processo de soldagem a ponto por resistência (*Resistance Spot Welding*), aplicada em chapas galvanizadas de aço baixo carbono livre de intersticiais (*Intersticial Free*), estabilizado ao Titânio; fabricadas pela siderúrgica CSN GalvaSud S.A; revestido através do processo de imersão a quente (Galvanização). A metodologia utilizada permitiu evidenciar uma combinação ótima dos parâmetros de força, tempo e corrente de soldagem. Para avaliação da resistência mecânica do ponto de solda foram realizados ensaios arrancamento e cisalhamento, além do ensaio de microdureza. Após a verificação dos resultados dos ensaios mecânicos para cada amostra foi realizada a avaliação microestrutural da área fundida e da zona termicamente afetada (ZTA), através da técnica de Microscopia Ótica (MO) e a verificação das dimensões da lente de solda. Para a verificação da redução de espessura da camada de revestimento na região soldada foi utilizado um microscópio eletrônico de varredura (MEV). Em suma, a metodologia utilizada para seleção de parâmetros permitiu evidenciar uma combinação ótima com parâmetros de força dos eletrodos de *2300N*, tempo de soldagem de 13*cy* e corrente de soldagem de 8,08*kA*, equivalente a 52% da potência elétrica da máquina de solda estacionária, para a união de chapas de aço IF sobrepostas com 0,75*mm de espessura,* garantido assim uma melhoria da qualidade dos pontos de solda.

Palavras-chave:
Parâmetros de Solda; Soldagem a Ponto por Resistência; Aços Livres de Intersticiais.

Rio de Janeiro
Setembro, 2015

ABSTRACT

AN EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF RESISTANCE SPOT WELDING PARAMETERS APPLIED TO INTERSTITIAL FREE (IF) STEEL SHEETS

Diego Meireles Lopes

Advisor:
Ricardo Alexandre de Amar Aguiar

Abstract of dissertation submitted to Postgraduate program in Mechanics Engineering and Technology of Materials – Federal Center of Technological Education Celso Suckow da Fonseca – CEFET/RJ as partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Mechanics Engineering and Technology of Materials.

This work aims to propose an experimental investigation of welding parameters through the process of resistance spot welding (RSW) applied to galvanized Interstitial Free steel sheets with 60 g/m^2 of nominal Zinc (Zn) coating, manufactured by CSN GalvaSud S.A, therefore, allowing to select the best combination of these welding parameters. The methodology consisted of using mechanical testing to evaluate the mechanical resistance of the spot weld, such as, micro hardness, tensile-shear and pullout tests. The main parameters selected through a survey of the weldability curve were: electrode force, time and welding current. A microstructural evaluation indicated by optical microscopy (OM) and scanning electron microscopy (SEM) were made reducing the thickness of the Zinc coating in the weld region and macro and microstructures were observed. The micro hardness test results presented hardness increase in weld nugget region, evidenced by differences in micro constituents evaluated by OM and SEM. The methodology used for welding parameters selection has highlighted the best combination of these with: 2300N electrodes force, 13cy welding time and 8.08kA welding current to galvanized IF steel sheets, with 0.75mm of thickness, ensures a better quality of spots.

Keywords:
Welding Parameters; Resistance Spot Welding; Interstitial Free Steel;

Rio de Janeiro
Setember, 2015

Sumário

I	**Introdução e Objetivos**	**1**
	I.1 Introdução	1
	I.1.1 O processo de soldagem a ponto na indústria automobilística	1
	I.1.2 A evolução do processo de soldagem a ponto por resistência	2
	I.1.3 A importância d avaliação dos principais parâmetros de soldagem	2
	I.2 Objetivo	3
	I.3 Organização do trabalho	4
II	**Revisão Bibliográfica**	**6**
	II.1 Fundamentos do processo de soldagem a ponto por resistência	6
	II.2 Parâmetros de Soldagem a ponto por resistência	10
	I.2.1 Corrente de Soldagem	13
	I.2.2 Força de Eletrodo	14
	I.2.3 Tempo de Soldagem	15
	I.2.4 Resistência Elétrica	17
	II.3 Tipos de Eletrodos	18
	II.4 Aços Livres de Intersticiais (IF)	19
III	**Metodologia experimental**	**21**
	III.1 Material	21
	III.2 Parâmetros de Soldagem	21
	III.3 Equipamentos de Soldagem	22
	III.3.1 Máquina de Solda	22
	III.3.2 Eletrodos	24

III.4 Equipamentos para Aquisição de Dados 24

III.4.1 Equipamento para medição de parâmetros de soldagem 25

III.4.2 Cinta Toroidal 25

III.4.3 Sensor de Calibração 26

III.5 Calibração 26

III.5.1 Processo de Calibração 26

III.5.2 Monitoramento dos Parâmetros de Soldagem 27

III.5.3 Aquisição de Dados de Calibração 27

III.6 Equipamentos de Ensaios Mecânicos 29

III.6.1 Máquina de Ensaio de Tração 29

III.6.1.1 Software de Aquisição de Dados de Ensaio de Cisalhamento 29

III.7 Ensaios Destrutivos 30

III.7.1 Ensaios Mecânicos 30

III.71.1 Ensaio de Cisalhamento 30

III.71.2 Ensaio de Arrancamento 32

III.8 Ensaios Metalográficos 33

III.8.1 Preparação de Amostras 34

III.9 Ensaio de Microdureza 36

IV Resultados e discussão 37

IV.1 Avaliação dos Resultados dos Ensaios Mecânicos 37

IV.1.1 Resultados dos Ensaio de Cisalhamento 38

IV.1.2 Resultados dos Ensaios de Arrancamento 45

IV.1.3 Resultados dos Ensaios de Microdureza Vickers 47

IV.2 Avaliação Microestrutural 51

IV.2.1 Microscopia Ótica 51

IV.2.2 Microscopia Eletrônica de Varredura 57

V Conclusões Finais 68

VI Sugestões para trabalhos futuros 69

Referências Bibliográficas 70

Lista de Figuras

FIG. I.1 Processo de soldagem a ponto na linha de montagem da Nissan..... 02
FIG. II.1 Impressões dos pontos de solda na carroceria do veículo Fiat Palio..... 07
FIG. II.2 Ilustração da região de formação da lente do ponto de solda..... 08
FIG. II.3 Características Geométricas do Ponto de Solda..... 09
FIG. II.4 Curva de soldabilidade em função do tempo e corrente de soldagem.....13
FIG. II.5 Ciclo do processo de soldagem a ponto por resistência.....16
FIG. II.6 Distribuição da temperatura durante o processo de soldagem..... 18
FIG. II.7 Gráfico comparativo, em função do limite de resistência versus o alongamento..... 19
FIG. II.8 Micrografia de um aço IF obtida por microscopia ótica, com aumento de 200x..... 20
FIG. III.1 Máquina de solda a ponto estacionária, da marca ULTRASOLDA..... 23
FIG. III.2 Capas de eletrodos utilizados nos experimentos de soldagem RSW..... 24
FIG. III.3 Equipamento Miyachi, modelo MM-380A, para medição de parâmetros..... 25
FIG. III.4 Cinta para medição de parâmetros, da marca Miyachi, modelo MB-800K..... 25
FIG. III.5 Sensor de medição de corrente/força, modelo MA-771A da marca Miyachi..... 26
FIG. III.6 Processo de soldagem a ponto para a união de chapas de aço IF..... 27
FIG. III.7 Gráfico de “Corrente média versus potência elétrica” durante calibração..... 28
FIG. III.8 Máquina da marca INSTRON®, utilizada para o ensaio de cisalhamento..... 29
FIG. III.9 Configurações esquemáticas dos corpos de prova para teste de cisalhamento..... 30
FIG. III.10 Posicionamento de um corpo de prova para ensaio de cisalhamento..... 31
FIG. III.11 Sequência do ensaio de arrancamento adaptado da norma AWS/SAE D8.9.97..... 32
FIG. III.12 Medições dos pontos de solda pela Norma AWS/SAE D8.9.97..... 32
FIG. III.13 Medição do diâmetro do ponto de solda 33
FIG. III.14 Medição da lente de solda, através do software OLYMPUS STREAM ESSENTIALS..... 35
FIG. III.15 Seção transversal da solda para ensaio de microdureza Vickers..... 36
FIG. IV.1 Ensaio de cisalhamento de um corpo de prova utilizado nos experimentos..... 38
FIG. IV.2 Resultados dos valores de carregamento no ensaio de cisalhamento..... 39
FIG. IV.3 Gráfico “Carregamento *versus* Tempo” das amostras com parâmetros: 13cy e 52%..... 39
FIG. IV.4 Curvas de carregamento *versus* deslocamento com do modo de falha do ponto de solda..... 40
FIG. IV.5 Impressões do ponto de solda após o ensaio de cisalhamento..... 41
FIG. IV.6 Corpo de prova nº 3 soldado com os parâmetros:2300N, 13cy e 7,47kA..... 42
FIG. IV.7 Corpos de prova soldados com os parâmetros:2300N; 13cy; 50% de potência..... 42
FIG. IV.8 Corpo de prova nº 5 soldado com os parâmetros:2300N; 13cy e 7,68kA..... 43
FIG. IV.9 Corpo de prova nº 3 soldado com os parâmetros:2300N; 13cy e 8,04kA..... 43
FIG. IV.10 Corpo de prova nº 2 soldado com os parâmetros:2300N; 13cy e 8,31kA..... 44
FIG. IV.11 Comparação do modo de falha do pontos de solda..... 44
FIG. IV.12 Corpo de prova com os parâmetros: 13cy; 52%, após o ensaio de arrancamento..... 45
FIG. IV.13 Gráfico apresentando o “Diâmetro do ponto de solda versus corrente de soldagem” dos melhores conjunto de parâmetros de soldagem selecionados..... 46
FIG. IV.14 Gráfico do tamanho da zona de fusão em função da corrente de soldagem..... 46

FIG. IV.15 Indicação dos pontos de microdureza Vickers na lente da seção transversal da solda com parâmetro de solda de: 2300N, 13cy e 51% para o ensaio de dureza Vickers..... 47
FIG. IV.16 Dureza medida nas principais regiões do ponto de solda para as condições com parâmetros de potência da máquina de solda em 51%..... 48
FIG. IV.17 Dureza medida nas principais regiões do ponto de solda para as condições com parâmetros de potência da máquina de solda em 52%..... 49
FIG. IV.18 Dureza medida nas principais regiões do ponto de solda para as condições com parâmetros de potência da máquina de solda em 53%..... 49
FIG. IV.19 Dureza medida nas principais regiões do ponto de solda para as condições com parâmetros de potência da máquina de solda em 50%, 51%, 52%, 53% e 53%..... 50
FIG. IV.20 Seção transversal de um ponto de solda, com formação da lente de solda, com parâmetros de 2300N, 13cy e 53%. Aumento de 12,5x. Ataque NITAL 10%..... 51
FIG. IV.21 Seção transversal de um ponto de solda, com formação da lente de solda, com parâmetros: 2300N, 13cy e 52%. Aumento de 12,5x. Ataque NITAL 10%..... 51
FIG. IV.22 Seção transversal de um ponto de solda, com formação da lente de solda, com parâmetros: 2300N, 13cy e 51%. Aumento de 12,5x. Ataque NITAL 10%..... 51
FIG. IV.23 Seção transversal de um ponto de solda, com aumento de 50x, apresentando uma má formação da lente de solda, com os seguintes parâmetros: 2300N, 13cy e 50%..... 52
FIG. IV.24 Seção transversal de um ponto de solda, com aumento de 100x, apresentando uma má formação da lente de solda, com os seguintes parâmetros: 2300N, 13cy e 50%..... 52
FIG. IV.25 Secção transversal do ponto de solda com os parâmetros: 2300N, 13 cy e 48%..... 52
FIG. IV.26 Secção transversal do ponto de solda com os parâmetros: 2300N, 13 cy e 49%..... 53
FIG. IV.27 Secção transversal do ponto de solda com os parâmetros: 2300N, 13 cy e 53%..... 54
FIG. IV.28 Secção transversal do ponto de solda com os parâmetros: 2300N, 13 cy e 52%..... 54
FIG. IV.29 Secção transversal do ponto de solda com os parâmetros: 2300N, 13 cy e 51%..... 54
FIG. IV.30 Detalhe da microestrutura na região de MB com parâmetros de 13cy e 52%. Aumento de 100x. Ataque: NITAL 10%..... 56
FIG. IV.31 Região superior e inferior de interface entre ZTA e a lente de solda, e à direita região de Metal Base (MB), com os parâmetro: 2300N, 13cy e 52%. Aumento de 100x. Ataque: NITAL 10%..... 56
FIG. IV.32 Detalhe da microestrutura na lente de solda com parâmetros 13cy e 52%. Aumento de 200x. Ataque: NITAL 10%..... 56
FIG. IV.33 Dimensão da camada superficial da junta soldada, na região do Metal Base, utilizando os parâmetros de solda: 2300N, 13cy e 51%. Aumento de 5000x. Ataque Nital 10%..... 57
FIG. IV.34 Espectro de EDS dos elementos de liga da camada superficial da junta soldada, com parâmetros 13cy e 51%, nas proximidades da região de Metal Base..... 58
FIG. IV.35 Dimensão da camada superficial da junta soldada, na ZTA próxima ao centro do ponto de solda, utilizando os parâmetros: 2300N, 13cy e 51%, 5000x. Ataque Nital 10%..... 58
FIG. IV.36 Espectro de EDS dos elementos de liga da camada superficial da junta soldada, da região da ZTA próxima ao centro da lente de solda com parâmetros 13cy e 51%..... 59

FIG. IV.37 Dimensão da camada superficial da junta soldada, na região do Metal Base, utilizando os parâmetros de solda: 2300N, 13cy e 52%. Aumento de 5000x. Ataque Nital 10%..... 60
FIG. IV.38 Apresentação dos pontos para a verificação do quantitativo dos principais elementos de liga, através da técnica por espectrometria de energia dispersiva (EDS)..... 60
FIG. IV.39 Espectro de EDS dos elementos de liga da camada superficial da junta soldada, com parâmetros 13cy, 2300N e 52%, na região da superfície do Metal Base (1)..... 61
FIG. IV.40 Espectro de EDS dos elementos de liga da junta soldada, com parâmetros 13cy, 2300N e 52%, na região de interface entre a camada de superfície e o Metal Base (2)..... 62
FIG. IV.41 Espectro de EDS dos elementos de liga da junta soldada, na região interna do Metal Base (3), empregando o conjunto de parâmetros de: 13cy, 2300N e 52%..... 62
FIG. IV.42 Dimensão da camada superficial da junta soldada, na ZTA próxima ao centro do ponto de solda, utilizando o conjunto de parâmetros 13cy e 52%..... 63
FIG. IV.43 Espectro de EDS dos elementos de liga da camada superficial da junta soldada, da região da ZTA próxima ao centro da lente de solda com parâmetros 13cy, 2300N e 52%..... 63
FIG. IV.44 Microscopia do centro do ponto de solda (zona de fusão), utilizando o conjunto de parâmetros de solda: 2300N, 13cy e 52%, com aumento de 5000x. Ataque Nital 10%..... 64
FIG. IV.45 Espectro de EDS dos elementos de liga do centro do ponto de solda, utilizando o conjunto de parâmetros: 2300N 13cy e 52%..... 65
FIG. IV.46 Dimensão da camada superficial da junta soldada, na ZTA próxima ao centro do ponto de solda, utilizando o conjunto de parâmetros: 2300*N*; 13cy e 53%, com aumento de 5000x..... 65
FIG. IV.47 Espectro de EDS dos elementos de liga da camada superficial da junta soldada, da região da ZTA próxima ao centro da lente de solda com parâmetros: 2300*N*; 13cy e 53%..... 66

Lista de Tabelas

TAB. II.1 Parâmetros de soldagem utilizados nos experimentos de (CHAN, 2005)..... 11
TAB. II.2 Conjuntos de parâmetros de soldagem: Força, Tempo e Corrente de Soldagem..... 11
TAB. II.3 Faixa de composição de aços IF (% massa)..... 20
TAB. III.1 Composição química do aço IF utilizado nos experimentos (%)..... 21
TAB. III.2 Propriedades mecânicas do aço IF utilizado nos experimentos..... 21
TAB. III.3 Tabela com parâmetros de soldagem que podem ser utilizados nos experimentos..... 22
TAB. III.4 Parâmetros de soldagem utilizados adotados nos experimentos..... 22
TAB. III.5 Parâmetros de soldagem adotados nos experimentos de calibração..... 28
TAB. IV.1 Conjuntos parâmetros de soldagem selecionados nesta dissertação..... 37
TAB. IV.2 Apresentação dos conjuntos de parâmetros de soldagem avaliados..... 38
TAB. IV.3 Dimensões do ponto de solda encontradas, após o ensaio de arrancamento da junta soldada com o conjunto de parâmetros selecionados..... 45
TAB. IV.4 Dimensões das lentes de solda para os parâmetros: 51%, 52% e 53%..... 55

Capítulo I – Introdução e Objetivos

I.1 Introdução

I.1.1. O processo de soldagem a ponto na indústria automobilística

Atualmente, as questões relativas à mobilidade urbana, à segurança viária, à eficiência energética, ao aumento da demanda por energia e o esgotamento gradual das reservas de petróleo tem propiciado o desenvolvimento de novas tecnologias. Entre as inovações tecnológicas do setor automotivo destacam-se o crescimento em pesquisa e desenvolvimento de novos materiais e a modernização dos principais processos de fabricação para a construção de veículos mais leves e mais seguros (POUVARANVARI, 2013).

A partir dessas novas possibilidades tecnológicas oferecidas, uma opção bastante empregada pela indústria automobilística é a utilização do processo de soldagem a ponto por resistência elétrica (*Resistance Spot Welding* - RSW), para a união de chapas de aço livres de intersticiais (*Interstitial Free Steel* – IF). Os aços IF apresentam em sua composição química baixo teor de Carbono e Nitrogênio; alguns elementos microligantes, tais como: Titânio e/ou Nióbio; e alguns elementos de liga, como por exemplo: Fósforo, Manganês e Silício, esses são adicionados para aumentar a resistência do aço, sem comprometer as características de conformidade, empregados para a fabricação de componentes de veículos, tais como: capô, carroceria, painel, portas, entre outros (FIETO, 2013).

Segundo RAOELISON *et. al.* (2014), um veículo de passeio, ao longo do seu processo de montagem, recebe em média 5000 pontos de solda em sua estrutura, os quais ao longo da linha de produção passam por vários processos de avaliação da qualidade. O processo de soldagem a ponto ainda é o mais empregado pelas montadoras automotivas devido a sua elevada produtividade, grande velocidade de operação e ampla capacidade de automatização através da utilização de robôs, apresentando maior facilidade de adaptação na linha de fabricação de carrocerias (BRANCO, 2004).

Segundo BARROS (2006), o processo de soldagem a ponto foi primeiro processo a ser robotizado na indústria automobilística, assim mudando completamente a concepção da montagem de automóveis ao longo da linha de produção industrial. Por isso, o processo de soldagem a ponto por resistência elétrica continua necessitando de melhorias para elevar sua eficiência, maior prevenção contra possíveis falhas mecânicas, assim, consequentemente gerando a redução de custos dos produtos fabricados pela indústria automobilística.

I.1.2. A evolução do processo de soldagem a ponto por resistência

Segundo DAMASCO (1995), o processo de soldagem elétrica foi inventado por Elihu Thomson, em 1877, que após o aperfeiçoamento do processo, patenteou um processo de soldagem a ponto por resistência elétrica e desde 1933, esse processo passou a ser amplamente difundido, principalmente na indústria automobilística, devido sua facilidade de automatização na linha de produção, conforme é apresentado na figura I.1.



Figura I.1 – Processo de soldagem a ponto na linha de montagem da Nissan.
Referência: Revista Automotive Business, Edição 31, Fevereiro de 2015.

Segundo FUKOMOTO *et., al.* (2009), as montadoras continuam empregando outros processos de soldagem na construção de carrocerias, tais como: MIG (*Metal Inert Gas*), MAG (*Metal Active Gas*), TIG (*Tungsten Inert Gas*), LBW (*Laser Beam Welding*). Por outro lado, nas duas últimas décadas, as indústrias aeroespaciais e automotivas também utilizam o processo híbrido para a união de chapas, através da colagem por adesivos juntamente com os mais diversos processos de soldagem (COSTA et., al. 2015).

I.1.3. A importância da avaliação dos principais parâmetros de soldagem

O procedimento de parametrização das máquinas de solda consiste em introduzir no sistema de controle, os mais diversos parâmetros de soldagem, os quais são necessários para realizar a união de chapas similares ou dissimilares com espessuras iguais ou diferentes, que atendam as especificações das normas de qualidade (BARROS, 2006).

Segundo CHAO (1999), os princípios físicos presentes durante o processo de soldagem a ponto são de natureza: metalúrgica, mecânica, térmica e elétrica. O princípio responsável pela geração da quantidade de calor produzida, em função da resistência do aço à passagem da corrente elétrica, necessária para a fusão da lente de solda é denominado efeito Joule.

O processo de soldagem a ponto por resistência consiste na união de chapas metálicas similares ou dissimilares de mesmas ou diferentes espessuras, onde ocorre a fusão do aço na lente de solda através da passagem de corrente elétrica pelos eletrodos. Esses são, geralmente, fabricados em cobre, que devido a uma determinada pressão na área de contato entre as chapas, ocorre a geração de calor necessária para garantir a boa soldabilidade das chapas de aço (BRANCO, 2004).

Neste processo de soldagem, a união das chapas ocorre sem o acréscimo de material ou deposição de metal de adição, embora diversos outros processos de soldagem sejam utilizados para a deposição de material sobre uma superfície. Normalmente na indústria automotiva os materiais mais empregados são o alumínio, os aços inoxidáveis e os aços carbono de baixa e média liga (ASLANLAR, 2005).

Segundo MARQUES (2009), os equipamentos industriais utilizados no processo de soldagem a ponto estão sendo aperfeiçoados com a introdução de novos métodos de controle de parâmetros que melhoram o nível de controle deste processo, que depende de diversas variáveis tais como: propriedades físicas, propriedades metalúrgicas, propriedades do material das chapas de aço, controle eletromecânico das máquinas de solda por resistência.

Portanto, o estudo de avaliação dos parâmetros de soldagem é importante para garantir a qualidade do ponto de solda, durante o processo de união das chapas metálicas, assim determinando o ajuste correto dos três parâmetros principais para a obtenção da curva de soldabilidade, são eles: corrente de soldagem; força das pinças do eletrodo; tempo de soldagem, em ciclos (AURES, 2006).

I.2. Objetivo

O objetivo principal deste trabalho foi indicar o melhor conjunto de parâmetros de soldagem a ponto por resistência elétrica, tais como: corrente de soldagem, força das pinças dos eletrodos e tempo de soldagem, aplicados para a união de juntas soldadas de aço IF, segundo as normas ANSI/AWS/SAE D8.9-97 e AWS D8.7-88/SAE J-1188, que são adotadas pela a indústria automotiva na construção de veículos.

Durante a fase inicial desse trabalho foram selecionados alguns conjuntos de parâmetros, a partir do estudo de algumas das principais referências bibliográficas, para a realização do processo de soldagem a ponto por resistência elétrica.

Esse processo de soldagem foi realizado mantendo constante a pressão dos eletrodos e o ciclo de soldagem (tempo) e variando somente a potência elétrica da máquina de solda a ponto estacionária, consequentemente alterando a corrente elétrica disponibilizada para a união de chapas de aço galvanizadas, a fim de verificar a flutuação dos valores aquisitados durante o processo de soldagem a ponto por resistência.

Os ensaios mecânicos de cisalhamento e arrancamento das amostras soldas foram realizados para avaliação da qualidade dos pontos de solda, baseadas nas normas utilizadas neste trabalho, a fim de verificar se os conjuntos de parâmetros de soldagem estão de acordo com os parâmetros adotados pela indústria automobilística.

Depois dessa avaliação inicial foram realizados ensaios de microdureza nas 3 (três) principais regiões da junta soldada: Lente de solda, Zona Termicamente Afetada e no Metal Base, nas amostras dos melhores conjuntos de parâmetros selecionados para este trabalho.

Por fim, após essa etapa anterior foi realizada a avaliação microestrutural, através do método por Microscopia Ótica (MO) e por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), para a verificação da ocorrência de mudanças microestruturais e desgaste da camada de revestimento na região da Lente de soldagem e na Zona Termicamente Afetada – ZTA.

A técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) foi utilizada para avaliar alguns aspectos de difícil visualização por Microscopia Ótica (MO) e para a avaliação da redução da camada superficial das chapas de aço IF galvanizadas.

Para cada condição avaliada por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) foram obtidas análises por espectrometria de energia dispersiva (EDS), pelo processo de microanálise química semiquantitativa por níveis de energia dispersiva de raios X, para a verificação de alguns dos principais elementos de liga presentes em cada região pontual.

I.3 Organização do trabalho

Esta dissertação, com ênfase experimental, apresenta um estudo detalhado sobre a avaliação de alguns conjuntos com principais parâmetros de soldagem a ponto por resistência elétrica, utilizados para a certificação de chapas de aço baixo carbono livre de intersticiais empregados pela indústria automobilística.

O presente trabalho está dividido em 6 capítulos, conforme a breve descrição abaixo:

- Capítulo I – Introdução e Objetivos;
- Capítulo II – Revisão Bibliográfica;
- Capítulo III – Metodologia Experimental;
- Capítulo IV – Resultados e Discussão;
- Capítulo V – Conclusões Finais;
- Capítulo VI – Sugestões para trabalhos futuros.

No capítulo I é apresentada uma introdução a cerca da evolução tecnológica do processo de soldagem a ponto por resistência na indústria automobilística, partir do avanço de novas possibilidades tecnológicas oferecidas e o objetivo deste trabalho.

No capítulo II segue uma breve apresentação sobre os fundamentos do processo de soldagem a ponto por resistência elétrica, além de uma revisão sobre os aços baixo carbono livres de intersticiais (*Interstitial Free* - IF), os quais são empregados neste trabalho.

No capítulo III estão apresentados os equipamentos e a especificação dos materiais empregados, além dos procedimentos para a calibração das máquinas de testes, aquisição dos dados dos ensaios e os procedimentos adotados para os ensaios mecânicos e metalográficos.

No capítulo IV estão apresentados os principais resultados dos ensaios de tração e dos ensaios de arrancamento, juntamente com as micrografias avaliadas através das técnicas de Microscopia Ótica (MO) e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), além da discussão para determinar a escolha do melhor conjunto de parâmetros de soldagem. Para cada condição avaliada pela técnica Microscopia Eletrônica de Varredura foram obtidas análises por Espectrometria de Energia Dispersiva (EDS), pelo processo de análise semi quantitativa, por níveis de energia dispersiva de raios X, para estimar a ordem de grandeza da quantidade de alguns dos principais elementos de liga presentes em cada região pontual da junta soldada.

No capítulo V estão apresentadas as conclusões deste trabalho experimental, a fim de indicar o melhor conjunto de parâmetros de soldagem determinados após um estudo minucioso das referências bibliográficas pesquisadas.

No capítulo VI são apresentadas algumas sugestões para trabalhos futuros nesta área de atuação, com aplicação direta voltada para a indústria automobilística.

Capítulo II – Revisão Bibliográfica

II.1. Fundamentos do processo de soldagem a ponto por resistência

A soldagem é o processo industrial mais importante para a fabricação de peças metálicas. Esse processo é utilizado como um método de união de chapas similares ou dissimilares de diferentes espessuras, através do aquecimento da junta metálica, até uma temperatura adequada para a fusão do material, com ou sem a aplicação de pressão e de metal de adição (MODENESI *et al.*, 2012).

Portanto, o emprego desse processo de soldagem tem crescido cada vez mais desde a sua criação em 1933, quando primeira chapa automotiva soldada, tornando-se predominante na montagem das carrocerias dos veículos atuais devido ao aumento da produtividade para satisfazer a elevada demanda do mercado (BRANCO, 2004).

Segundo MODENESI *et al.* (2006), os principais processos de soldagem por resistência elétrica são:

- Soldagem por ponto (*Resistance Spot Welding* – RSW);
- Soldagem por projeção (*Resistance Projection Welding* – RPW);
- Soldagem por costura (Resistance Seam Welding - RSEW);
- Soldagem a topo por Resistencia (*Upset Welding* – UW);

Assim, o processo de soldagem a ponto por resistência elétrica (*Resistance Spot Welding* – RSW) é o mais empregado pelas montadoras automotivas, devido a sua elevada produtividade e baixo custo, a partir da maior velocidade de operação e ampla capacidade de automatização, através da utilização de robôs, apresentando melhor facilidade de adaptação na linha de fabricação de carrocerias (POURANVARI e MARASHI, 2013).

Segundo DAMASCO (1995), no processo de soldagem a ponto por resistência, duas ou mais chapas de aço sobrepostas são primeiramente pressionadas por meio de dois eletrodos em compressão, movimentados por forças mecânicas, pneumáticas, hidráulicas ou ambas.

Segundo POUVARANVARI e MARASHI (2013), os princípios físicos presentes durante o processo de soldagem a ponto por resistência elétrica são de natureza: metalúrgica, mecânica, térmica e elétrica.

Segundo POURANVARI e MARASHI (2013), os principais fatores que estão sujeitos a modificações durante o processo de soldagem a ponto por resistência são: Tempo de compressão, Tempo de soldagem, Corrente de soldagem, Força do eletrodo, Tempo de resfriamento. Esses fatores podem variar de acordo com a espessura da chapa a ser soldada, que pode também pode apresentar ou não redução da espessura do revestimento, além de alterar a dimensão da extremidade do eletrodo, que determina o diâmetro de contato (área de contato), entre os eletrodos e as chapas metálicas.

Todavia, o princípio físico responsável pela geração da quantidade de calor produzida no processo de soldagem a ponto por resistência, em função da resistência do metal base à passagem da corrente elétrica, necessária para a fusão da lente de solda é denominado efeito Joule (CHAO, 1999).

A figura II.1 exibe as impressões dos pontos de solda gerados pelo processo de soldagem por resistência a ponto, durante a montagem de componentes automotivos, fabricados com chapas metálicas de aço baixo carbono livre de intersticiais (IF).



Figura II.1 – Impressões dos pontos de solda na carroceria do veículo Fiat Palio.

AURES (2006) cita em seu trabalho que no processo de soldagem a ponto por resistência, a união das chapas de aço ocorre sem o acréscimo de material ou deposição de metal de adição, pois a combinação correta dos parâmetros de soldagem, tais como: Força dos eletrodos, Corrente de soldagem e Ciclo de soldagem (tempo de soldagem) são suficientes para provocar a fusão do aço na região da Lente de solda, conforme mostrado na ilustração da figura II.2, assim, garantindo uma boa soldabilidade da junta soldada.

Segundo PODRŽAJ *et. al.* (2008), esses 3 (três) parâmetros: corrente elétrica, tempo de soldagem e resistência total, influenciam na geração de calor durante o processo de soldagem a ponto por resistência é expresso pela equação 1:

$$Q_G = \int_0^{Tw} i^2_w(t) \cdot R_T(t) d(t) \qquad \textbf{eq. 1}$$

Onde:

Q_G - Calor gerado no processo de soldagem em Joules;
I_w - Corrente elétrica em Ampéres;
R_T – Resistência total em Ohms;
T_w - Tempo de duração da corrente elétrica em segundos;
(t) – Tempo em segundos.

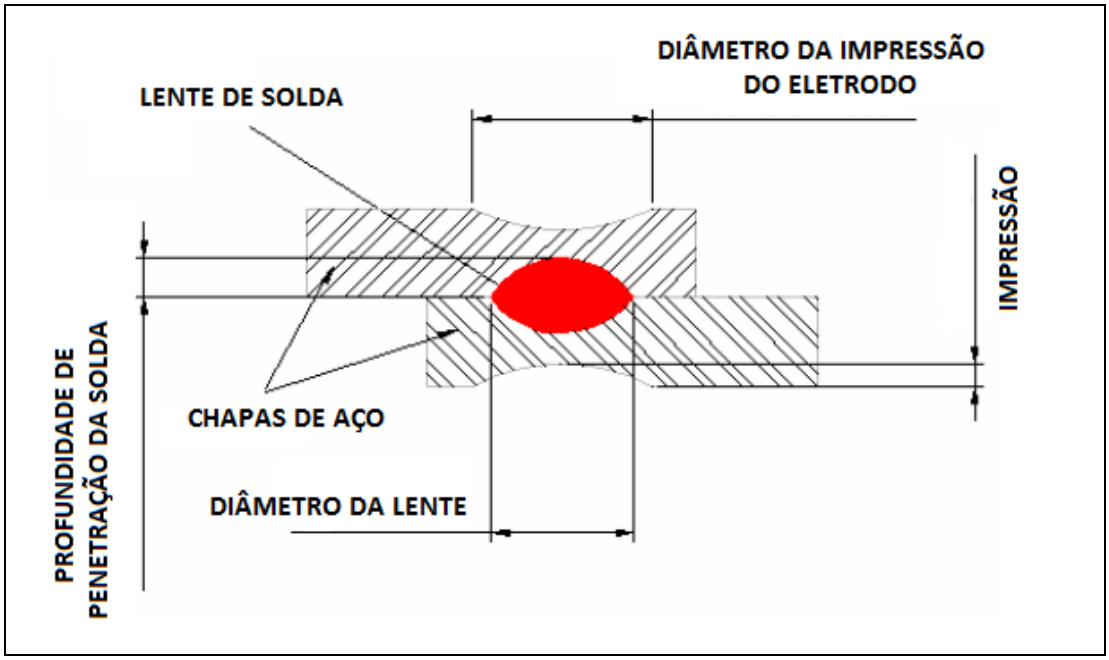


Figura II.2 – Ilustração da região de formação da lente do ponto de solda.

Adaptado de BRANCO (2004).

O calor gerado no processo de soldagem a ponto por resistência elétrica é proporcional ao quadrado da corrente de soldagem e diretamente proporcional à resistência total e o tempo de duração da corrente elétrica. Contudo, uma parte deste calor gerado é utilizada na fusão da lente de solda e outra parte é perdida por condução, convecção e radiação para o metal base da chapa de aço e para os eletrodos. Embora, o impacto gerado por essas perdas seja geralmente desconhecido AURES (2006).

Assim, a geração de calor é resultante da ação combinada destes três parâmetros: Corrente elétrica, Tempo de soldagem e resistência Ôhmica. Assim, a resistência do aço à passagem desse fluxo de corrente elétrica, passando pela área de contato, gera uma determinada quantidade de calor nas superfícies, suficiente para provocar a fusão do aço nessa região, que também é conhecida como Lente de solda (METALS HANDBOOK, 1983).

Além disso, existem outras variáveis no processo de soldagem que influenciam diretamente na geração de calor, tais como:

- As condições das superfícies das chapas - A resistência de contato pode ser afetada por sujeira, óleo e outros contaminantes na superfície;

- A composição química de um metal - Determina seu calor específico, temperatura e o calor latente de fusão, e a condutibilidade térmica. Estas propriedades governam a quantidade de calor requerida para fundir o metal na lente de solda.

Contudo, os fatores mecânicos que podem ser citados como os que estão sujeitos a modificações durante o processo de soldagem a ponto são: Tempo de compressão, Tempo de soldagem, Corrente de solda, Força do eletrodo, Tempo de resfriamento e o tipo do eletrodo utilizado, que podem variar de acordo com a chapa a ser soldada, pois esta pode apresentar ou não revestimento, além da dimensão da extremidade do eletrodo, que determinará a área de contato entre eles e as chapas (BRANCO, 2004).

Segundo POUVARANVARI e MARASHI (2013), o ponto de solda está dividido em 3 zonas com microestruturas diferentes, conforme ilustração da figura.II.3

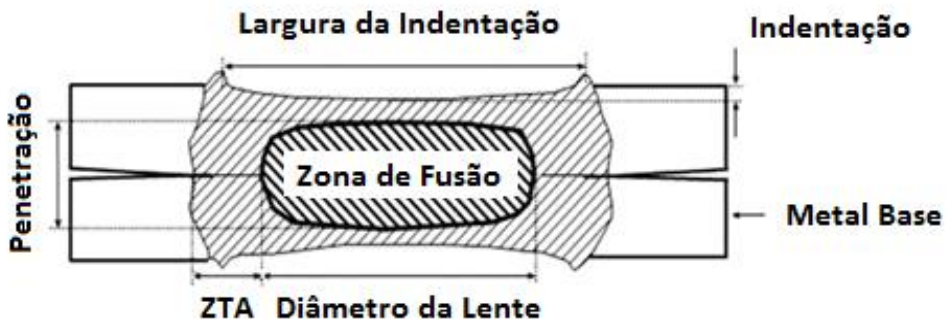


Figura II.3 – Características Geométricas do Ponto de Solda.
Adaptado de ZHOU *et al.* (2003).

Segundo GOODARZI *et. al.* (2009), a macroestrutura encontrada nos pontos de solda, em chapas galvanizadas de aço baixo carbono está dividida em três regiões com diferentes, com microestruturas distintas, conforme descrito abaixo:

a) Zona de Fusão – ZF (*Fusion Zone* - FZ): A zona de fusão também é conhecida como a região de “Lente da Solda” (Weld Nugget). Essa região é fundida e depois se solidifica imediatamente após o processo de soldagem. A zona de fusão é caracterizada por grãos colunares.

b) Zona Termicamente Afetada – ZTA (*Heat Affected Zone* – HAZ ou *Thermal Affected Zone* - TAZ): É uma região no ponto de solda que não é fundida durante o processo de soldagem, embora ocorre mudanças em sua microestrutura afetando diretamente as propriedades mecânicas do ponto de solda.

c) Metal Base – MB (*Base Metal* – BM): É uma região que não sofre mudanças metalúrgicas durante o processo de soldagem a ponto por resistência (*Resistance Spot Welding* – RSW), assim mantendo suas principais características mecânicas.

II.2 Parâmetros de soldagem a ponto por resistência

Segundo NASCIMENTO (2008), na indústria automotiva, ao longo de uma produção em alta escala é difícil manter as condições ideais de parâmetros de soldagem a ponto, devido às mais diversas condições de parâmetros de soldagem.

Os parâmetros de soldagem são as condições que a partir de um valor pré-determinado e uma combinação entre esses são responsáveis por realizar o processo de soldagem para a união de chapas metálicas. Os valores da combinação desses parâmetros são diretamente responsáveis pela boa ou má qualidade da junta soldada.

COMITRA *et al*. (2006) avaliaram a seleção de diversos conjuntos de parâmetros de soldagem. Um dos experimentos realizados com aplicação na indústria automotiva foi utilizado os seguintes parâmetros: corrente de solda igual a 10*kA* e o tempo de soldagem de 14*cy*, com a força dos eletrodos mantida em 2300*N* em chapas de aço galvanizado de baixo carbono com 0,7*mm* de espessura.

CHAN (2005) em seu estudo sobre desgaste das capas de eletrodos empregados no processo de soldagem a ponto por resistência de chapas de aço baixo carbono galvanizado de alta resistência, com espessura de 0,7*mm*, selecionou alguns dos principais parâmetros ótimos de soldagem. Esses valores selecionados estão apresentados na tabela II.01.

Tabela II.01: Parâmetros de soldagem utilizados nos experimentos de CHAN, 2005.

Parâmetros de Soldagem	
Força dos eletrodos (N)	2000*N*
Potência elétrica da máquina (%)	52%
Corrente de Soldagem (kA)	8,5*kA*
Tempo de Soldagem (cy)	11*cy*

CHAKRABORTY *et al.* (2011), no artigo publicado sobre as modificações da microestrutura em pontos de solda de chapas galvanizadas de aço IF de 1*mm* de espessura, investigaram essas modificações utilizando os parâmetros de força de pinça, corrente e tempo de soldagem apresentados na Tabela II.02 e verificaram que a variação dos parâmetros influencia diretamente nos valores de dureza da ZTA e da lente de solda e no tamanho do diâmetro da lente de solda.

Tabela II.08: Conjuntos de parâmetros de soldagem a ponto por resistência:
Adaptado de CHAKRABORTY *et al.* (2011).

Parâmetros de Soldagem		
Corrente de soldagem (kA)	Tempo de soldagem (Ciclos)	Força dos eletrodos (N)
7	8	4109
7	12	5598
8	6	4423
8	10	6344
9	6	5889
9	8	6502

Segundo POURANVARI *et al.* (2013), o diâmetro do ponto de solda é o parâmetro mais importante para determinar seu comportamento mecânico. As montadoras de veículos, na maioria dos casos, utilizam as normas recomendadas pela AWS/ANSI/AISI para a medição do diâmetro crítico dos pontos de solda.

Existem diversas normas utilizadas pela indústria automotiva que recomendam um diâmetro mínimo da lente de solda em função da espessura da chapa. Segue abaixo as normas americanas, japonesas e alemãs, respectivamente:

a) ANSI/AWS/SAE D8.9-97 – *"Recommended practices for test methods and evaluation the RSW behavior of automotive sheet steels*, 1997*"*

b) JIS Z 3140 – *"Method of inspection for spot welds, 1989"*

c) DVS 2923 – "*Resistance spot welding, German Standard, 1986"*

Segundo a norma ANSI/AWS/SAE D8.9-97, para medição do diâmetro crítico será utilizado um critério em função da espessura da chapa a ser soldada, conforme equação eq.2:

$$MWS = 4\sqrt{t} \qquad \textbf{eq. 2}$$

Por outro lado, as normas JIS Z 3140 e DVS 2923 recomendam diâmetro mínimo do ponto de solda maior, em função da espessura da chapa, conforme equação eq.3:

$$MWS = 5\sqrt{t} \qquad \textbf{eq. 3}$$

Portanto, a qualidade dos pontos de solda é influenciada diretamente pela dimensão do diâmetro da lente de solda, em função dos parâmetros de soldagem empregados para a união de chapas metálicas, levando-se em consideração o tipo de material a ser soldado, a espessura das chapas e o tipo de revestimento desse material. Embora, existem diversos outros parâmetros que também influenciam na qualidade do ponto de solda (SANTOS 2006).

O gráfico de soldabilidade é um dos métodos mais eficientes para avaliar as características de soldabilidade das chapas de metálicas, assim como a qualidade da solda, em função das dimensões do ponto de solda (MANSUR, 1998).

Segundo DIAS (2011), para a seleção dos conjuntos de parâmetros de soldagem é necessário conhecer o comportamento do Gráfico de Soldabilidade do aço empregado na junta a ser soldada. Este gráfico é utilizado para determinar a faixa da corrente de soldagem função do ciclo de soldagem (tempo), conforme mostrado na figura II.4.

O gráfico de soldabilidade é plotado em função da combinação do tempo e corrente de soldagem. A curva à esquerda é resultante do diâmetro de lente de solda conforme eq.2, ou seja, aproximadamente 80% do diâmetro do eletrodo.

Entretanto, a curva à direita é resultante do diâmetro de lente de solda conforme eq.3, neste caso, na região acima ocorre expulsão do material fundido da região da solda. Por outro lado, os pontos de solda são considerados inaceitáveis nas demais outras regiões fora da interseção destas curvas. (DIAS, 2011).

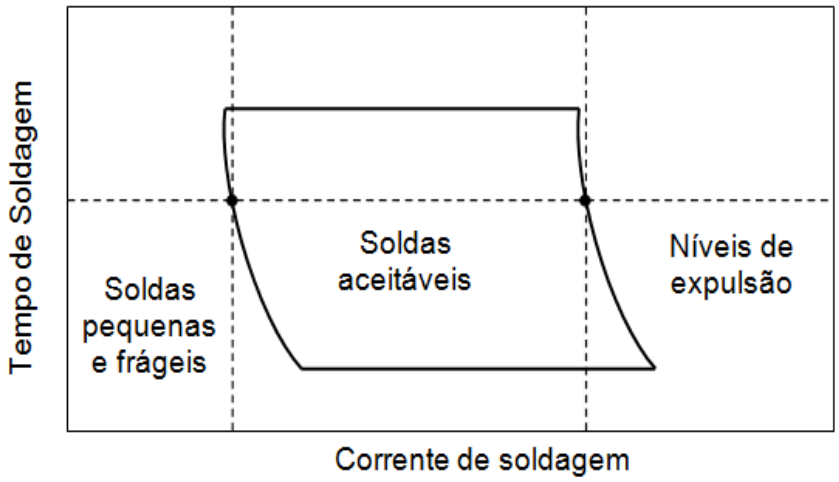


Figura II.4 – Curva de soldabilidade em função do tempo e corrente de soldagem. Adaptado de (DIAS, 2011).

II.2.1. Corrente de soldagem

Segundo BRANCO (2004), para realização do processo de soldagem a ponto de chapas de aços galvanizados recomenda-se a utilização máquinas de solda com correntes mais elevadas do que as empregadas no mesmo processo de soldagem, em aços sem revestimento e de mesma espessura da chapa metálica. Assim, a máquina de soldagem transforma a elevada tensão, recebida da linha de transmissão de energia elétrica, em baixa tensão e alta corrente elétrica.

A corrente de soldagem é recebida através da rede de alimentação, sob a forma de corrente contínua ou corrente alternada, ambas são fornecidas pelas operadoras de distribuição de energia, conforme disponibilidade da rede elétrica.

Essa corrente elétrica, em *Ampére* [A], assim que disponível na rede de alimentação passa pelo circuito primário do transformador da máquina de solda a ponto por resistência e depois passa através do circuito secundário até chegar a superfície das chapas metálicas a serem soldadas (AWS, 1998).

Segundo AURES (2006), algumas máquinas estacionárias utilizam um sistema monofásico de corrente alternada com a mesma freqüência fornecida na linha de transmissão de energia elétrica. Geralmente, as operadoras de energia fornecem a tensão elétrica na faixa de frequência de aproximadamente 60 Hz.

A necessidade de corrente elétrica mais elevada é importante para garantir a soldagem, devido à baixa resistência de contato do revestimento de zinco. Esse motivo implica na utilização de máquinas de solda com transformadores mais robustos e com um sistema de resfriamento mais eficiente para evitar superaquecimento (INTERMACHINERY, 2003 e TECNOWELDING, 2004).

Segundo NASCIMENTO (2008), esse tipo de transformador utilizado nas máquinas estacionárias não atende as elevadas demandas de potência requeridas pelo processo de soldagem em escala industrial. Por isso, atualmente são empregadas máquinas automatizadas com transformadores trifásicos e pontes retificadoras ou transformadores MF/DC (*Medium Frequency/Direct Current*), utilizando uma corrente contínua de média frequência de 1 kHz, para atender a elevada demanda da indústria automobilísitca.

II.2.2. Força de eletrodo

Segundo BARROS (2006), a força de eletrodo é aquela aplicada pelos eletrodos às chapas metálicas, durante o ciclo de soldagem, transmitida aos eletrodos de soldagem de forma pneumática. Geralmente, essa força é medida como um valor estático é uma força dinâmica em operação, afetada diretamente pelo atrito com as superfícies das chapas e pela inércia das partes móveis da máquina de solda.

A força do eletrodo afeta diretamente a resistência de contato, que também é responsável formação do ponto de solda. À medida que a força de eletrodo aumenta, os pontos sofrem uma deformação. Na maioria dos casos, o material do eletrodo possui menor dureza do que das chapas metálicas. Consequentemente, uma aplicação adequada da força do eletrodo produzirá melhor contato nas interfaces eletrodo com as chapas (SOUZA, 2006).

Segundo BRANCO (2004), a pressão aplicada pelos eletrodos nas interfaces com as chapas depende da área das faces do eletrodo em contato com as mesmas. As principais funções desta força são:

a) Manter as chapas em contato;
b) Redução da resistência de contato nas interfaces;
c) Impedir a expulsão do metal de solda da junta;
d) Garantir uma boa formação da lente de solda.

Portanto, a força dos eletrodos deve ser suficiente para garantir que o metal fundido seja limitado dentro dos parâmetros dimensionais do diâmetro da face dos mesmos. Quando há uma diminuição da força aplicada pelos eletrodos pode ocorrer à expulsão de material na superfície externa da chapa (NASCIMENTO, 2008).

Por outro lado, segundo MODENESI *et. al. (*2012), quando essa força proveniente dos eletrodos é muito elevada, a resistência na superfície das chapas metálicas será mínima, assim, reduzindo o calor gerado nesta área de contato.

Segundo BRANCO (2004), a partir do aumento excessivo da força de contato dos eletrodos nas chapas, os pontos de solda estarão com diâmetro abaixo do especificado ou até mesmo a falta de fusão. Contudo, os pontos de solda formados a partir de uma elevada força de contato dos eletrodos, provalvemente exibirão uma impressão excessiva na superfície externa da chapa metálica.

II.2.3. Tempo de soldagem

Segundo SOUZA (2006), ciclo do processo de soldagem por resistência a ponto pode ser dividido em função do tempo de compressão, tempo de soldagem, tempo de retenção, tempo de pausa, conforme apresentado na figura II.5. portanto, tem-se que:

- Tempo de Compressão: É o tempo em que os eletrodos comprimem as chapas metálicas até o início da passagem da corrente;
- Tempo de Solda: É o intervalo de tempo durante ocorre a passagem da corrente elétrica, mantendo-se a compressão das chapas pelas pinças;
- Tempo de Retenção: É o tempo em que a compressão é mantida, após a passagem da corrente, para garantir o resfriamento e solidificação do botão de solda;
- Tempo de Pausa: É o tempo em que os eletrodos não estão em contato com as chapas.

O tempo de soldagem, conforme evidenciado na figura II.5, ocorre no período entre o início e o término da passagem de corrente elétrica, através das pinças em contato com as chapas metálicas. Nota-se que o tempo de soldagem pode ser diretamente relacionado com a capacidade de fusão do aço, ou seja, é diretamente proporcional a quantidade de calor gerada na junta.

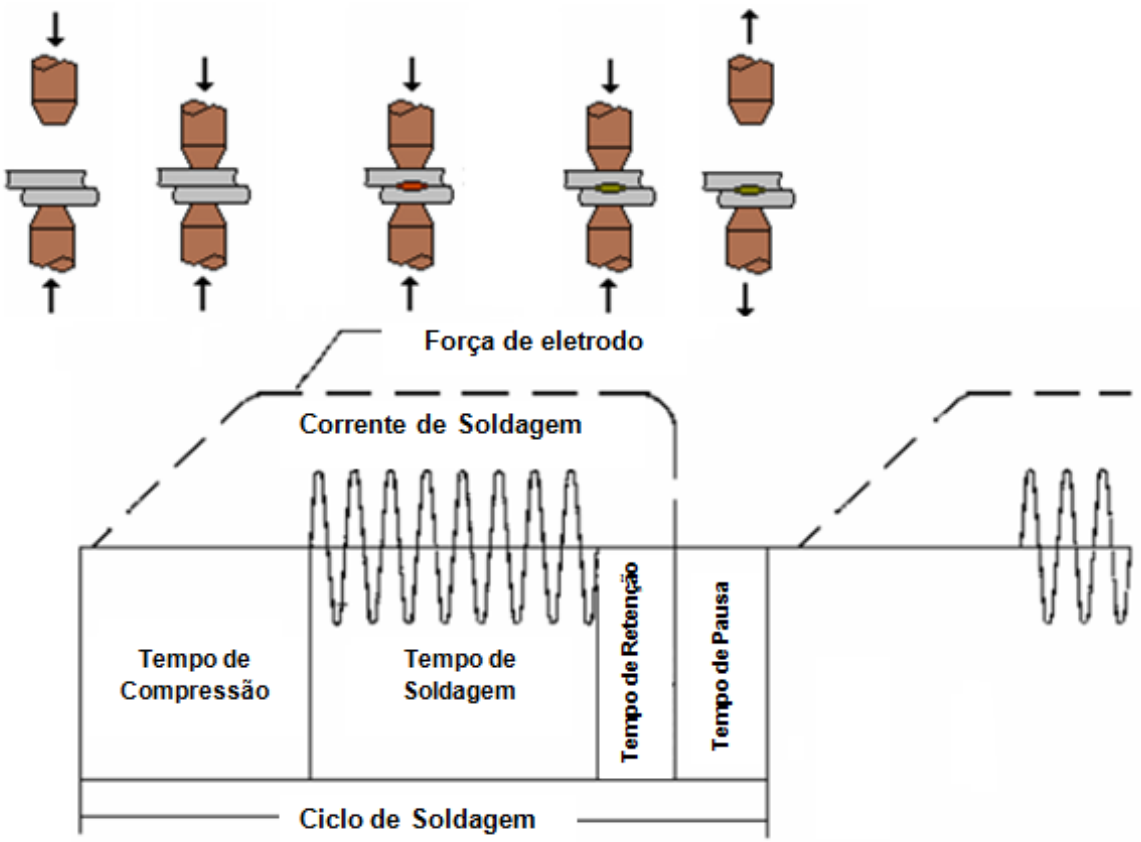


Figura II.5 – Ciclo do processo de soldagem a ponto por resistência.
Adaptado de SOUZA (2006).

O ajuste do ciclo de soldagem varia diretamente com o tipo de material da junta a ser soldada; a espessura das chapas metálicas, e tratamento superficial (galvanização), assim deverá ser selecionado em função dos demais parâmetros de soldagem (AURES, 2006).

Segundo DIAS (2011), o ciclo do processo de soldagem a ponto por resistência está diretamente relacionado com a frequência da rede elétrica fornecida pelas operadoras de energia no país, que neste caso é de 60 Hz e o parâmetro de tempo de soldagem é mensurado em ciclos (*cy*) de soldagem.

Na equação eq.4 é apresentada para a conversão do parâmetro de tempo de soldagem (Ts), em ciclos (T) para tempo em segundos [s], em função da frequência da rede elétrica em Hertz [Hz]:

$$T = \frac{1}{f} \qquad \textbf{eq. 4}$$

Onde,

T = Período [s];
f = Frequência [Hz].

A partir da equação 4, o pulso ou ciclo terá a duração de: 1/60 segundos, assim, considerando que o equipamento utilizado neste trabalho de dissertação foi instalado em uma rede elétrica de 60 Hz. Portanto, o período será aproximadamente 0,0167 segundos.

II.2.4. Resistência elétrica

Segundo NASCIMENTO (2008), a resistência elétrica total no circuito é o fator determinante no processo de soldagem, pois a partir desse valor pode-se determinar os parâmetros de soldagem. A resistência elétrica da peça não é um parâmetro, mas apresenta uma grande importância, pois a mesma também é responsável pela geração de calor devido à oposição à passagem da corrente (Efeito Joule).

O esquema de distribuição de temperatura durante o processo de soldagem a ponto por resistência pode apresentar os efeitos diretos na de geração de calor e dissipação nas peças de trabalho e eletrodos, em função de suas resistências conectadas em série, tais como:

1. Resistência elétrica do material do eletrodo de cobre (superior);
2. Resistência de contato entre o eletrodo de cobre e a chapa de aço (superior);
3. Resistência do metal base da chapa de aço (superior);
4. Resistência do metal base na região de fusão do aço;
5. Resistência do metal base da chapa de aço (inferior),
6. Resistência de contato entre o eletrodo de cobre e a chapa de aço (inferior).
7. Resistência elétrica do material do eletrodo de cobre (inferior).

Segundo PODRŽAJ *et. al.* (2008), a região de interface entre as chapas metálicas apresenta maior temperatura de soldagem, devido a elevada resistência elétrica e boa condutibilidade elétrica, consequentemente, na passagem de elevadas correntes elétricas propicia a maior geração de calor para a fusão do aço na região da lente de solda, conforme figura XX.

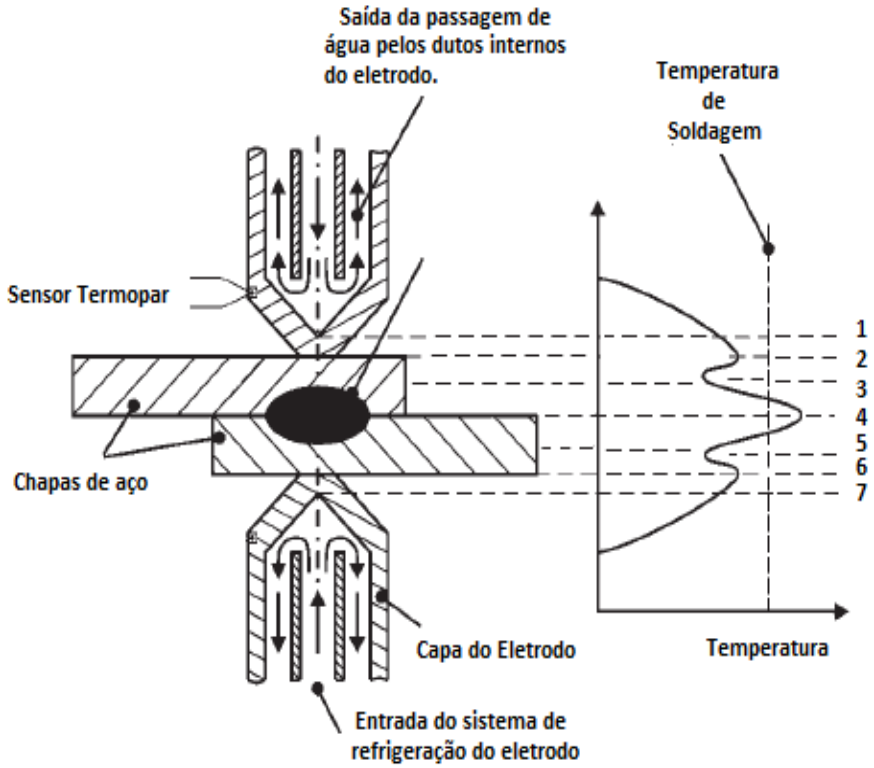


Figura II.6 – Distribuição da temperatura durante o processo de soldagem.
Adaptado de PODRŽAJ *et. al*. (2008).

II.3 Tipos de eletrodos

Segundo BRANCO (2004), os eletrodos geralmente são fabricados de ligas de cobre e desempenham uma função muito importante na geração de calor e devem possuir boa condutibilidade elétrica, e apresentar resistência mecânica e dureza adequadas para resistir as deformações proveniente por repetições e elevadas solicitações térmicas.

Os eletrodos de cobre (Cu) são elementos condutores de eletricidade, pois conduzem a corrente de soldagem entre as chapas metálicas e transferem a pressão (força) necessária para garantir a fusão do aço na lente de solda e também auxiliam na dissipação do calor nas principais regiões da junta soldada.

No caso do processo de soldagem a ponto (*Resistance Spot Welding* - RSW), a área de contato do eletrodo com a chapa de aço determina diretamente no tamanho do diâmetro do ponto de solda e a densidade de corrente de soldagem necessária para a fusão do aço.

Os eletrodos podem se apresentar em forma de capas, pontas arredondadas, discos, portanto, a qualidade do ponto de solda depende diretamente do estado de conservação e desgaste da capa de eletrodo durante o processo de soldagem. Assim, estes devem garantir condutividade elétrica e térmica suficientemente elevada e resistência de contato baixa para evitar o aquecimento excessivo da superfície das chapas metálicas.

II.4. Aços livres de intersticiais (IF)

Segundo HOOK (1975), a produção das primeiras chapas comerciais de aço livre de intersticiais (*Interstitial Free Steel* - IF) iniciou-se na década de 70. Contudo, segundo BREPOHL (2013), entre as inovações tecnológicas do setor automotivo destacam-se o crescimento em pesquisa e desenvolvimento dos aços baixo carbono livres de intersticiais, revestidos por uma camada superficial de zinco (Zn), conforme apresentado no gráfico de desenvolvimento dos aços, na figura II.7.

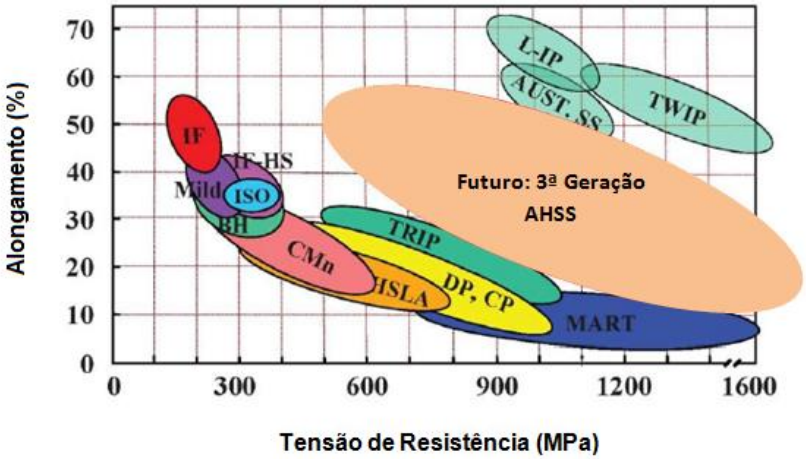


Figura II.7 – Gráfico com o comparativo do limite de resistência versus o alongamento. Adaptado de (CGEE/ABM/MCTI, 2008).

Os aços IF são empregados em situações que exigem maior resistência à corrosão, ótima conformidade e estampagem para a fabricação de autopeças, através do processo de soldagem a ponto, pois as montadoras necessitam construir automóveis com estruturas mais leves e seguras (CHAKRABORTY *et al.*, 2011).

Os aços IF apresentam em sua composição química baixo teor de Carbono e Nitrogênio, elementos microligantes, tais como: Titânio (Ti) e/ou Nióbio (Nb), esses eliminam o envelhecimento por deformação; e alguns elementos de liga, por exemplo: Fósforo (P), Manganês (Mn) e Silício (Si), Enxofre (S) esses últimos são adicionados para aumentar a resistência do aço, que garante elevada característica de conformabilidade e estampabilidade, por isso se distinguem dos aços convencionais pelas seguintes propriedades mecânicas: alta qualidade superficial, baixo limite de escoamento, elevado índice de alongamento, entre outros aspectos (FIETO, 2013).

Esses aços livres de intersticiais apresentam na sua composição química, em percentual de massa, cerca de 99,7% de ferro e aproximadamente 0,003% de carbono. A faixa de variação do percentual de massa, típica da composição química destes aços baixo carbono lF é mostrada na Tabela II. 3 de KRAUSS et al. (1991).

Tabela II.3 – Faixa de composição de aços IF (% massa). Fonte: KRAUSS *et al.* (1991).

C	Mn	P	Si	S	Al	Ti	N	Nb
0,002 - 0,008	0,10 - 0,34	0,01 - 0,02	0,01 - 0,03	0,004 - 0,010	0,03 - 0,07	0,01 - 0,11	0,001 - 0,005	0,005 - 0,040

Para LASCOSQUI *et al.* (2007), a nomenclatura aço IF é utilizada, para aços baixo carbono, por não apresentar uma concentração significativa de átomos de carbono e nitrogênio livres para se localizados nos interstícios da rede cristalina de átomos de ferro. Na figura II.8 é mostrada uma micrografia de um aço IF, obtida através da técnica de microscopia ótica (MO), com aumento de 200x apresentada em (CORREIA JÚNIOR, 2012).

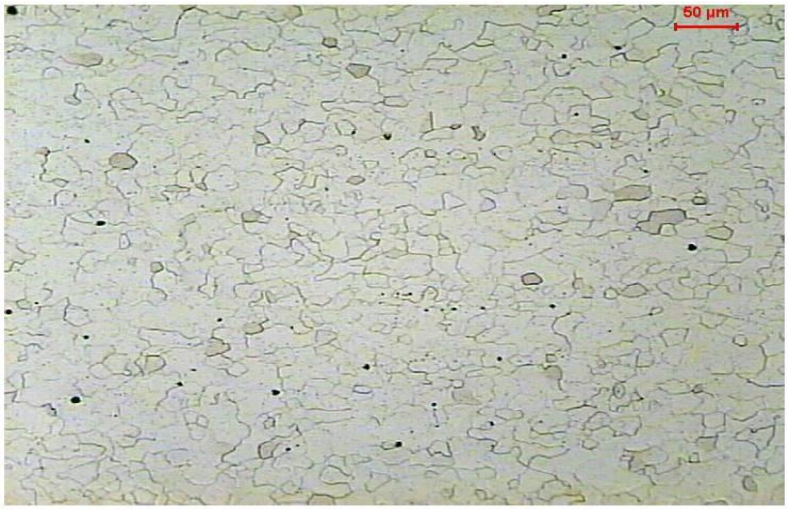


Figura II.8 – Micrografia de um aço IF obtida por microscopia ótica, com aumento de 200x.
Fonte: Figura apresentada em (CORREIA JÚNIOR, 2012).

Capítulo III – Metodologia Experimental

III.1 Material

Neste trabalho experimental foram utilizadas chapas de aço galvanizadas, com densidade de 786kg/m^3 e espessura de 0,75mm, de aço carbono livre de intersticial (IF) estabilizado ao Titânio (Ti), revestido através do processo de imersão a quente, com revestimento nominal de zinco de 60g/m^2, fabricadas pela empresa CSN GalvaSud S.A.

Na tabela III.1 segue a especificação da composição química do material, conforme dados fornecidos pela empresa CSN GalvaSud S.A.

Tabela III.1: Composição química do aço IF utilizado nos experimentos (%)

C	Mn	P	Si	S	Al	Ti	N	Nb
0,0026	0,11	0,01	0,007	0,008	0,038	0,055	0,004	0,002

Na tabela III.2 estão apresentadas principais as propriedades mecânicas: limite de escoamento, limite de resistência, alongamento, dureza e rugosidade fornecidos pela empresa.

Tabela III.2: Propriedades mecânicas do aço IF utilizado nos experimentos.

Propriedades Mecânicas	
Limite de Escoamento (*MPa*)	182
Limite de Resistência (*MPa*)	296
Alongamento (L = 80)	43
Dureza (*HRB*)	37
Rugosidade (μm)	0,8 - 0,7

III.2 Parâmetros de soldagem

Os parâmetros de solda devem ser arbitrados, de acordo com o critério do diâmetro mínimo e diâmetro máximo do ponto de solda, necessários para a fusão do aço, com referência a norma ANSI/AWS/SAE D8.9-97. Esta norma adotada é utilizada em certificações de chapas metálicas galvanizadas, empregadas pela indústria automotiva, assim, estão apresentados os parâmetros de soldagem definidos conforme mostrado na tabela III.3.

Tabela III.3: Tabela com parâmetros de soldagem que podem ser utilizados nos experimentos.

Espessura das chapas (mm)	Tipo do Eletrodo (RWMA)	Diâmetro da face dos eletrodos	Força das pinças (kN)	Refriamento (l/min)	Tempo de soldagem (Ciclos)	Tempo de retenção (Ciclos)	Tempo de Pausa (Ciclos)	Taxa de Resfriamento (W/min)
0,70 - 0,78	2	5	2	4	11	5	90	25

A partir da avaliação dos parâmetros de soldagem a ponto por resistência apresentados na norma ANSI/AWS/SAE D8.9-97, os conjuntos de parâmetros de soldagem foram escolhidos em função das chapas de aço baixo carbono livre de intersticiais (*Interstitial Free Steel* - IF), com 0,75*mm* de espessura. Esses parâmetros de soldagem adotados neste trabalho estão apresentados na tabela III.4:

Tabela III.4: Parâmetros de soldagem utilizados adotados nos experimentos.

Parâmetros de Soldagem	
Pressão dos eletrodos [N]	2300*N*
Potência elétrica da máquina (%)	48% a 53%
Tempo de solda (cy)	13*cy*
Tempo da 1ª Compressão (cy)	65*cy*
Tempo da 2ª Compressão (cy)	35*cy*
Tempo de Retenção (cy)	5*cy*
Tempo de pausa (cy)	82*cy*
Tempo total de soldagem (cy)	200*cy*
Tempo total de soldagem (s)	3,34*s*
Taxa de soldagem (solda/min)	18 *soldas/min*
Corrente de Soldagem [kA]	7,0*kA* a 8,5*kA*

III.3 Equipamentos de soldagem

III.3.1. Máquina de solda.

Os experimentos de soldagem a ponto foram realizados em uma máquina estacionária, localizada no laboratório de soldagem do centro de pesquisa e desenvolvimento da CSN. Essa máquina utilizada no processo de soldagem a ponto por resistência elétrica é compostas basicamente por três elementos: Circuito de controle, circuito elétrico e sistema mecânico.

A máquina de soldagem, da marca ULTRASOLDA, utilizada para a realização dos experimentos possui 150 *kVA* de potência elétrica, quando está conectada a rede elétrica de corrente alternada, com uma frequência de 60 Hz e possui um regulador da potência do transformador, para ajuste da corrente de soldagem. Essa máquina também possui um conjunto de pinças com dois eletrodos, conforme mostrado na figura III.1.

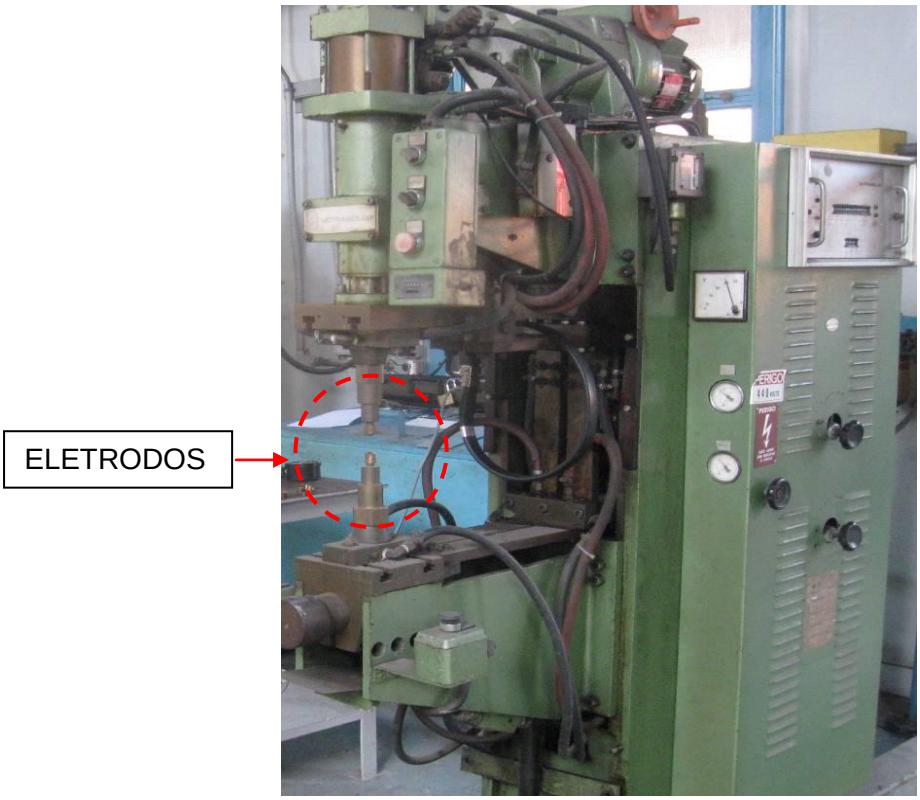


Figura III.1 – Máquina de soldagem estacionária, da marca ULTRASOLDA.

Na máquina utilizada, o circuito de controle é o responsável pelo controle de alguns parâmetros de soldagem, tais como: Intensidade e tempo da corrente elétrica de soldagem, liberação do mecanismo de força do eletrodo no tempo correto, entre outros.

Já o circuito elétrico é composto de um transformador e um circuito secundário, incluindo os dois eletrodos, que conduzem a corrente de soldagem, garantindo a soldagem das chapas metálicas. Assim, o sistema mecânico é composto por meios hidráulicos, pneumáticos responsáveis pela aplicação da velocidade e força dos eletrodos.

Essa máquina de soldagem possui um sistema de refrigeração a água com vazão de 4 l/min, para resfriamento especialmente dos eletrodos, além de possuir diversas conexões para realizar o acionamento pneumático por pedal, através da alimentação de ar comprimido, gerado por um compressor externo. A contagem dos pontos de solda foi realizada através de um contador que está acoplado na própria máquina.

III.3.2. Eletrodos.

Conforme a Norma AWS D8.9-97, os eletrodos utilizados nos experimentos, apresentados na figura III.4, possuem o diâmetro da face (diâmetro de contato) de aproximadamente 5 mm, com 45º de ângulo de “bisel” (*Bevel Angle*).

Essas capas de eletrodos que foram utilizadas para a realização dos experimentos de soldagem a ponto por resistência (RSW) são do tipo cone truncado, fêmeas com cone interno 1:10, classificadas em: Grupo A, Classe 2 (RWMA 2.18200), fabricadas através do processo de Usinagem, com uma composição de Cobre e Cromo (Cu/Cr) e no mínimo com dureza Rockwell de 75HRB.

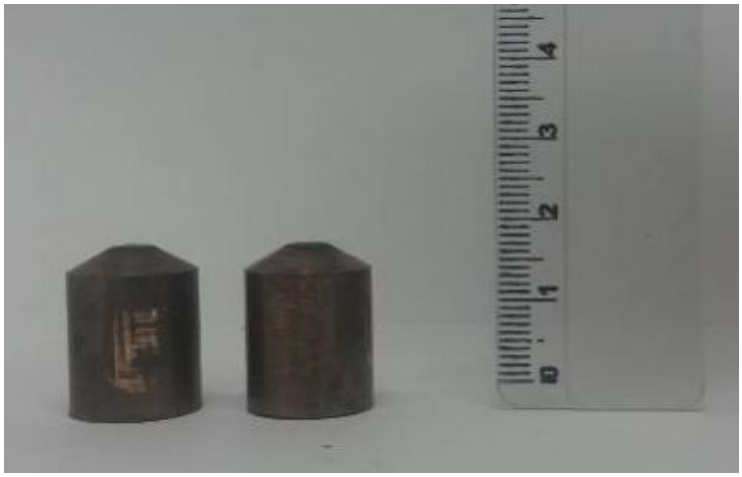


Figura III.2 – Capas de eletrodos utilizados nos experimentos de soldagem RSW.

Segundo RWMA (2002), para um bom desempenho durante o processo de soldagem a ponto, o ângulo de inclinação do cone deve ser de aproximadamente 30º, esse é o ângulo formado pelo plano perpendicular a linha horizontal da chapa e o plano tangente a borda do eletrodo. A tabela A1, apresentada na seção A2 do Anexo A, na Norma AWS D8.9-97, detalha toda a especificação, incluindo as dimensões das capas eletrodos, diâmetro do corpo do eletrodo, diâmetro da face, entre outros.

III.4 Equipamentos para aquisição de dados

Os equipamentos industriais empregados no processo de soldagem a ponto por resistência são aperfeiçoados, a partir da introdução de melhores métodos de controle de parâmetros e concomitantemente o crescente desenvolvimento de diversas características de soldabilidade dos aços, tais como: propriedades físicas, propriedades metalúrgicas, propriedades mecânicas do material das chapas de aço (WILLIAMS e PARKER, 2004).

III.4.1. Equipamento para medição de parâmetros de soldagem.

Para a realização da medição, em tempo real, dos parâmetros de soldagem, para a garantia da precisão dos valores de Força, Tempo e Corrente de soldagem fornecidos pela maquina de solda foi utilizado um equipamento da marca Miyachi, modelo MM-380A, com faixa de corrente de 0,01 a 200 kA, conforme apresentado na figura III.3.



Figura III.3 – Equipamento Miyachi, modelo MM-380A, para medição de parâmetros.

III.4.2. Cinta toroidal.

Para a medição da corrente elétrica disponível pela máquina foi utilizada uma cinta do tipo toroide (“*Toroidal Coil*”), da marca Miyachi, modelo MB-800K, que acoplada no braço da máquina, verifica a corrente elétrica disponível pelo induzido, através do sistema de aquisição de dados de calibração, conforme apresentado a seguir na figura III.4.



Figura III.4 – Cinta para medição de parâmetros, da marca Miyachi, modelo MB-800K.

III.4.3. Sensor de calibração

Para a calibração da corrente de soldagem e pressão dos eletrodos foi utilizado um sensor digital corrente e força, da marca Miyachi, modelo MA-771A, com célula de carga na faixa de 50 – 1000*kgf*, conforme mostrado na figura III.5.



Figura III.5 – Sensor de medição de corrente/força, modelo MA-771A da marca Miyachi.

III.5 Calibração.

III.5.1. Processo de calibração.

O processo de calibração consiste em ajustar a máquina de solda a ponto, com os parâmetros de tempo (ciclos), corrente elétrica e pressão dos eletrodos desejados para garantir o processo de soldagem das chapas metálicas. Ainda na máquina de solda foram acoplados por meio de conectores os seguintes equipamentos: cinta toroidal e o sensor de calibração de corrente/força, conectados por cabos de comunicação ao equipamento de aquisição de dados.

O primeiro procedimento realizado foi verificar a integridade das conexões hidráulicas e pneumáticas, depois foi verificado o alinhamento dos eletrodos, após esse primeiro procedimento foi acionado os equipamentos de aquisição de dados e ajustada a pressão dos eletrodos com uma força média de aproximadamente 2300 N. Após o procedimento inicial, as duas chapas de aço IF sobrepostas foram posicionadas entre os eletrodos e foram executados 50 pontos de solda.

III.5.2. Monitoramento dos parâmetros de soldagem.

Primeiramente executou-se procedimento de calibração da máquina de solda a ponto, conforme descrito anteriormente, assim, garantindo a precisão dos valores dos parâmetros de tempo de soldagem, corrente e força. Nesta etapa de monitoramento dos valores dos parâmetros, durante o processo de soldagem, conforme figura III.6, foi utilizado o medidor de parâmetros, Miyachi MM-380A, para a medição do tempo de soldagem que foi mantida em 13*cy* e da corrente de soldagem que foi mensurada em função da potência do transformador da máquina de solda, esta variou entre 7,0 a 8,5*kA*.

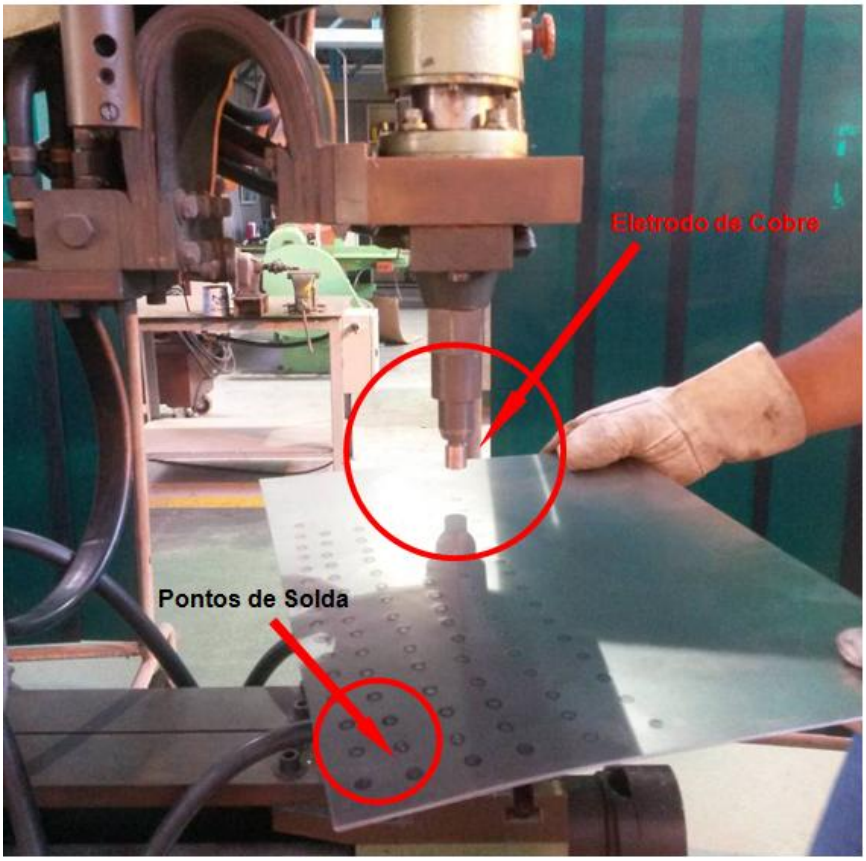


Figura III.6 – Processo de soldagem a ponto para a união de chapas de aço IF.

III.5.3. Aquisição de dados de calibração.

Neste procedimento foi verificado o valor da corrente de soldagem, através do sensor corrente/força digital Miyachi MA-771A, a fim de verificar a flutuação de energia na rede disponível pela concessionária, após a execução dos 50 primeiros pontos de solda necessários para a calibração da máquina foram realizados 15 pontos de solda para cada conjunto de parâmetros arbitrados, onde a potência selecionada de variou de 48% a 53%, conforme dados apresentados na tabela III.5.

Tabela III.5: Parâmetros de soldagem adotados nos experimentos de calibração.

Dados de Calibração dos parâmetros de soldagem		
Potência Elétrica	**Corrente de Soldagem (Média)**	**Desvio Padrão**
48%	7,083*kA*	0,0305
49%	7,089*kA*	0,0578
50%	7,214*kA*	0,0184
51%	7,499*kA*	0,0546
52%	7,697*kA*	0,0693
53%	8,093*kA*	0,0349

A seguir o gráfico “Corrente média de soldagem *versus* potência elétrica”, apresentado na figura III.7, com resultados aquisitados na calibração da máquina para cada conjunto de parâmetros de variando a potência elétrica entre 48% a 53%.

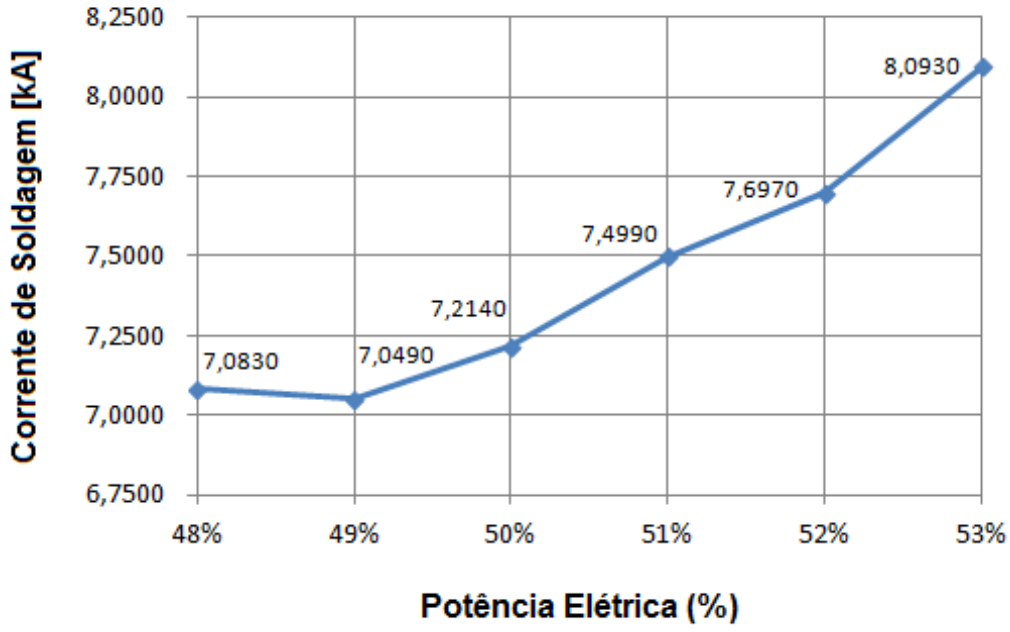


Figura III.7 – Gráfico de “Corrente média versus potência elétrica” durante calibração.

A partir dos resultados dos dados de calibração foi verificado que a flutuação dos valores da corrente de soldagem, aquisitados durante o procedimento de calibração estão de acordo com o esperado no processo de soldagem a ponto por resistência, o qual a corrente de soldagem aumenta em função do aumento da potência elétrica da máquina de solda a ponto estacionária.

III.6 Equipamentos de ensaios mecânicos

III.6.1. Máquina de ensaio de tração.

Para a realização dos ensaios de cisalhamento foi utilizada uma maquina de ensaio de tração da marca INSTRON®, modelo 5966 e uma célula de carga para carregamento máximo de 10*kN*, localizado no Laboratório de Compósitos e Adesivos – LADES, no CEFET/RJ, conforme apresentado na figura III.8.

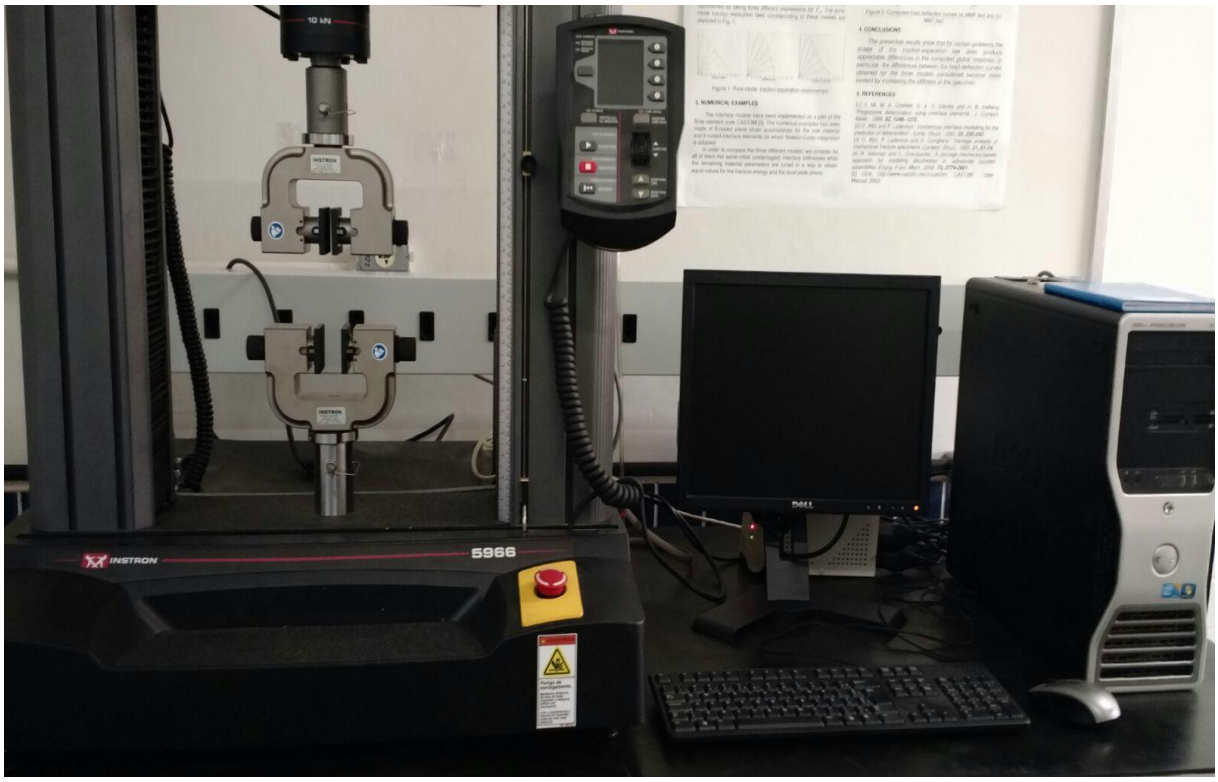


Figura III.8 – Máquina da marca INSTRON® utilizada para o ensaio de cisalhamento.

III.6.1.1. Software de aquisição de dados de ensaio de cisalhamento

O software “Blue Hill 3” instalado no computador do laboratório foi utilizado para aquisição de dados gerados pela máquina da INSTRON® durante o ensaio de cisalhamento dos corpos de prova.

A partir dos dados aquisitados durante esse ensaio mecânico foram gerados gráficos, para a verificação da tensão máxima de cisalhamento dos pontos de solda, para cada uma das combinações dos parâmetros de soldagem selecionados: 2300*N*, 13*cy*, 48%; 2300*N*, 13*cy*, 49%; 2300*N*, 13*cy*, 50%; 2300*N*, 13*cy*, 51%; 2300*N*, 13*cy*, 52%; 2300*N*, 13*cy*, 53%.

III.7 Ensaios destrutivos

A qualidade do ponto de solda pode ser verificada através de dois modos: quantitativos ou qualitativos. O desempenho do ponto de solda é avaliado a partir dos resultados dos ensaios de tensão de cisalhamento, resistência à tração, resistência ao arrancamento e ensaios de impacto e de fadiga comumente. Contudo, por razões práticas, somente os testes de tensão de cisalhamento são realizados na maioria dos casos. (ZHOU *et al.*, 2003).

III.7.1. Ensaios mecânicos

Neste trabalho experimental foram escolhidos os seguintes ensaios mecânicos: Ensaio de Arrancamento e Ensaio de Cisalhamento. Segundo KAVAMURA (2007) não existe um modelo padronizado estabelecido apresentando as dimensões das amostras utilizadas nos mais diversos ensaios mecânicos de juntas metálicas soldadas.

III.7.1.1. Ensaio de cisalhamento

O ensaio de cisalhamento por tração é o mais utilizado como referência para avaliar a resistência mecânica dos pontos de solda em juntas soldadas. Para este ensaio foi utilizada uma maquina de ensaio de tração e foram adotadas as dimensões dos corpos de provas estabelecidos pelas normas das pelas instituições AWS e ISO.

Segundo a Norma ANSI/AWS/SAE D8.9-97, para a realização do ensaio de cisalhamento, os corpos de prova foram cortados nas seguintes dimensões: 45 x 105 mm, conforme a figura III.9, obedecendo a margem de tolerância aceitável, determinada por essa norma empregada.

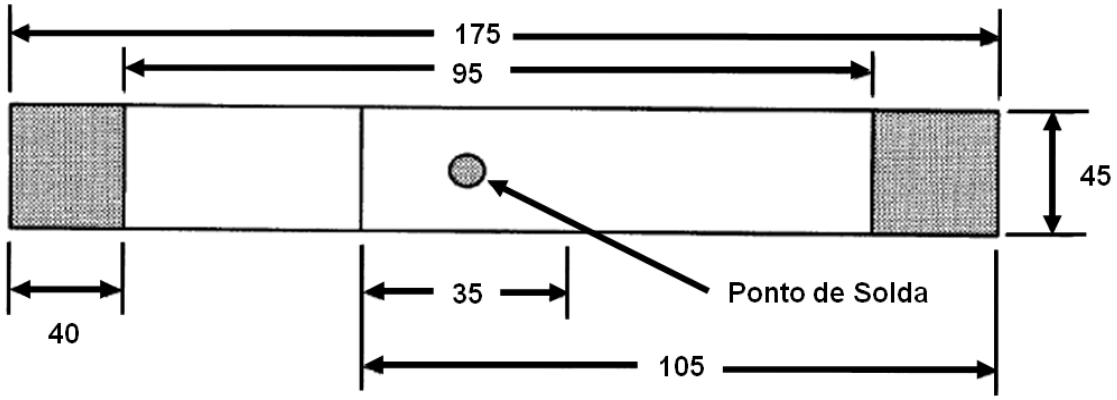


Figura III.9 – Configurações esquemáticas dos corpos de prova para teste de cisalhamento. Dimensões em [mm]. Fonte: Norma AWS/SAE D8.9-97, 1997.

Neste trabalho, a velocidade da máquina da marca INSTRON®, apresentada na figura III.10 foi ajustada para 5*mm/minuto*, conforme publicado em outros trabalhos. Contudo, a velocidade de 10*mm/minuto*, sugerida pela norma AWS D8.9-97 não foi utilizada neste trabalho, pois foi necessário diminuir a taxa de deformação, para verificar de maneira mais eficiente, os valores dos resultados do ensaio de cisalhamento obtidos neste trabalho.



Figura III.10 – Posicionamento de um corpo de prova no ensaio de cisalhamento.

Por exemplo, MARQUES (2008) em seu trabalho utilizou uma máquina de tração, da marca INSTRON® modelo 8502, com velocidade de tração de 5*mm/minuto*, para verificar a tensão de cisalhamento até a ruptura do ponto de solda em um aço baixo carbono.

Outro exemplo, ROSSI (2007) em seu trabalho obedeceu ao critério de “condição quase estática” para o ensaio de cisalhamento com velocidade da máquina de tração com 5 *mm/minutos*, até a ruptura do ponto de solda. Por outro lado, para o ensaio de tração utilizando uma máquina universal da máquina INSTRON®, GOODARZI *et al.* (2008) adotou a velocidade da máquina em 2*mm/minutos* para tipo de esse ensaio.

III.7.1.2. Ensaio de arrancamento

Segundo MANSUR (1998), o ensaio de arrancamento é o mais utilizado em soldas a ponto por várias razões, tais como: baixo custo de execução; facilidade de aplicação para controle de qualidade; entre outros aspectos. Esse ensaio pode ser realizado através de uma maquina MTS (*Material Test System*) ou manualmente.

Neste trabalho foram utilizadas as mesmas dimensões dos corpos de prova, conforme as especificações da norma AWS D8.9-97. Após soldagem das chapas metálicas conforme os parâmetros adotados, os corpos de prova foram fixados em um torno de bancada e com um dispositivo apropriado foram dobrados até o completo arrancamento do ponto de solda, conforme sequência mostrada na figura III.11.

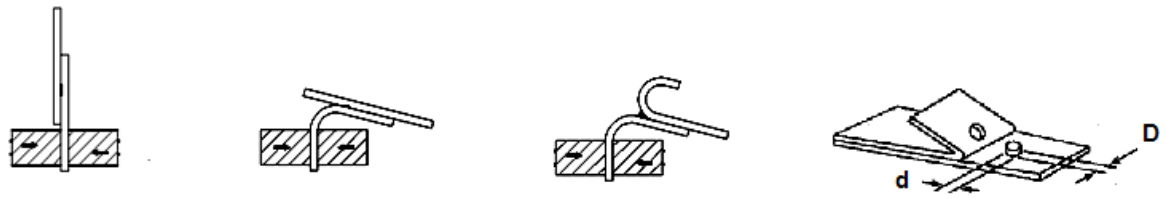


Figura III.11 – Sequência do ensaio de arrancamento adaptado da norma AWS/SAE D8.9-97.

Em seguida através de um paquímetro aferido, foi medido em duas direções perpendiculares o diâmetro do ponto de solda aderido a uma das chapas, conforme esquema a ser observado na figura III.12.

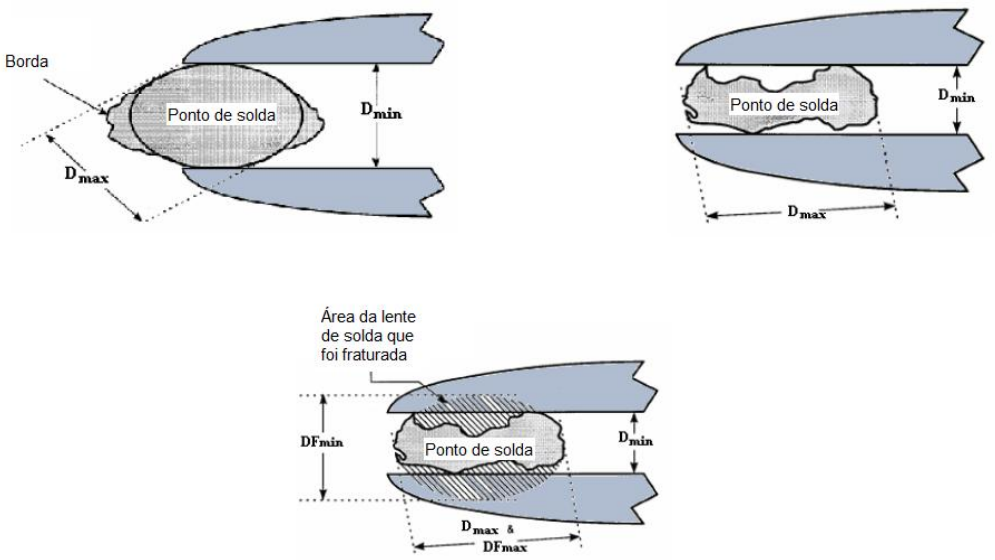


Figura III.12 – Medições dos pontos de solda pela Norma AWS/SAE D8.9-97

O diâmetro do ponto de solda, obtido a partir das especificações citadas na Norma AWS/SAE D8.9-97 é medido após a realização do ensaio de arrancamento. Esses valores verificados para o diâmetro da solda são importantes para gerar as curvas que determinam um gráfico de soldabilidade.

A figura III.13 apresenta a medição do diâmetro da amostra número 2, nomeada por: 52.2, após a realização do ensaio de arrancamento, utilizando um Paquímetro, da marca DIGIMESS, com resolução de 0,05mm, com calibração dentro da data de validade. Essa amostra foi soldada com o seguinte conjunto de parâmetros de soldagem: 2300*N*, 13*cy* e 8,08*kA*, com ajuste de 52% de potência da máquina de solda estacionária.

Após esse procedimento de medição foi verificado se o ponto de solda está dentro da conformidade, de acordo com a norma AWS/SAE D8.9-97. Essa informação é determinante para traçar os pontos das curvas que compõem o gráfico de soldabilidade.

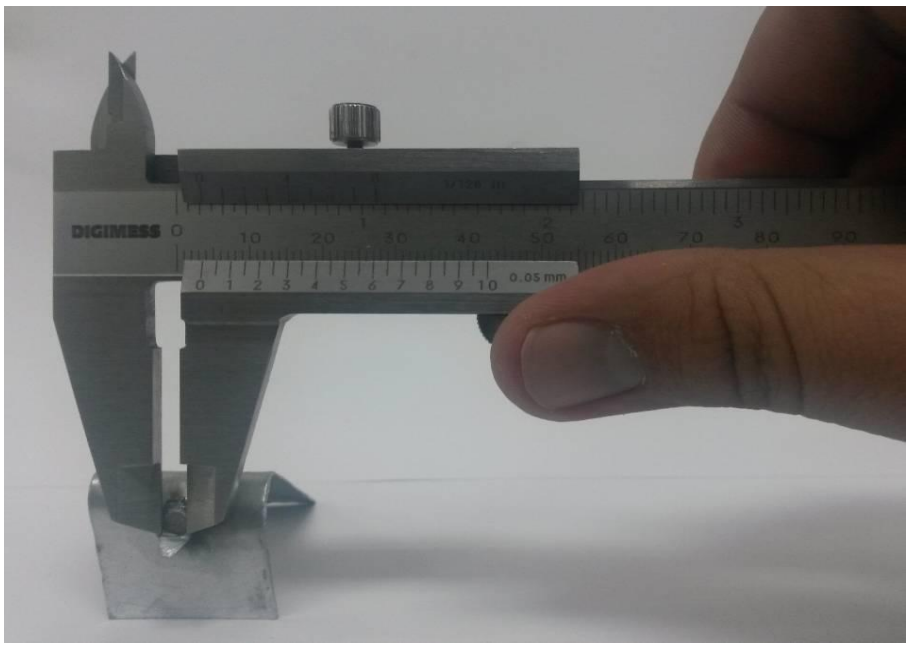


Figura III.13 – Medições do diâmetro do ponto de solda.

III.8. Ensaios metalográficos.

A análise microestrutural, na seção transversal de um ponto de solda, realizada através das técnicas de microscopia óptica (MO) e microscopia eletrônica de varredura (MEV), conforme mostrado na figura IV.32, tem como principal finalidade verificar a microestrutura do aço nas principais regiões do ponto de solda, tais como: Lente de solda (LENTE), Zona Termicamente Afetada (ZTA) e Metal base (MB), além de avaliar possíveis defeitos na região da área de fusão e eventuais desgastes da camada de revestimento de aços IF galvanizados.

III.8.1. Preparação de amostras

Após os ensaios de arrancamento foram retiradas seções dos pontos de solda dos 6 conjuntos de parâmetros de solda analisados, para que cada seção do ponto de solda das amostras fossem embutidas com a resina de baquelite, para a realização dos ensaios metalográficos.

As amostras das seções do ponto de solda foram embutidas com resina de baquelite, na forma de pó, marca Struers (*Poly Fast*). Foi utilizada uma prensa de embutimento da marca AROTEC, modelo PRE-30, cuja função é comprimir o pó de baquelite, aquecer e por fim, resfriar a amostra embutida com a resina. Essas amostras foram identificadas, seguindo para o processo de lixamento no equipamento da marca AROTEC. Esse foi utilizado para a preparação das amostras com lixas abrasivas na seguinte sequência granulométrica: 100, 220, 320, 400 e 600 e polidas sequencialmente com abrasivo em pasta de diamante de 6, 3 e 1*μm.*

Para realização dos ensaios metalográficos foi realizado um procedimento de ataque químico das amostras embutidas, através de uma metodologia própria, realizado com reagente de solução mista de 10% Ácido Nítrico (HNO3) e 90% Álcool Etílico Absoluto (C2H6O), também conhecido como NITAL 10%, através do processo de esfregamento, durante o tempo de aproximadamente 5 a 10 segundos, até a revelação da lente de solda, preparado na capela de preparação de reagentes químicos.

Após o processo de ataque químico foram realizados ensaios metalográficos para verificar e mensurar o diâmetro (interno e externo) dos pontos de solda no microscópio óptico, da marca OLYMPUS, modelo BX60MF, juntamente com o *Hardware* acoplado ao microscópio no laboratório LAMAT do CEFET/RJ.

As imagens das amostras conjuntos de parâmetros: 2300*N*, 13*cy*, 48%; 2300*N*, 13*cy*, 49%; 2300*N*, 13*cy*, 50%; 2300*N*, 13*cy*, 51%; 2300*N*, 13*cy*, 52%; 2300*N*, 13*cy*, 53% foram captadas utilizando uma câmera Olympus U-TVO.5C-3 com lente UC-50 e o recurso de medições da lente de solda foi realizado com auxílio do software OLYMPUS STREAM ESSENTIALS.

A análise microestrutural da junta soldada tem como principal finalidade avaliar a microestrutura do aço nas regiões da lente de solda, da zona termicamente afetada e do metal base. Essa análise foi realizada através dos processos de microscopia óptica (MO) e microscopia eletrônica de varredura (MEV).

A primeira análise por microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi realizada no LAMAT no CEFET/RJ. O equipamento utilizado foi um microscópio modelo X-MAX/CAM SCAN 3200 LV – da marca OXFORD Instruments. Este procedimento foi realizado para a verificação da microestrutura em diferentes regiões do ponto de solda, nos seguintes conjuntos de parâmetros: 2300N; 13cy e 53%; 2300N, 13cy e 52%; 2300N, 13 cy e 51%; 2300N, 13 cy e 50% de potência da máquina de solda, conforme apresentado na figura III.14.

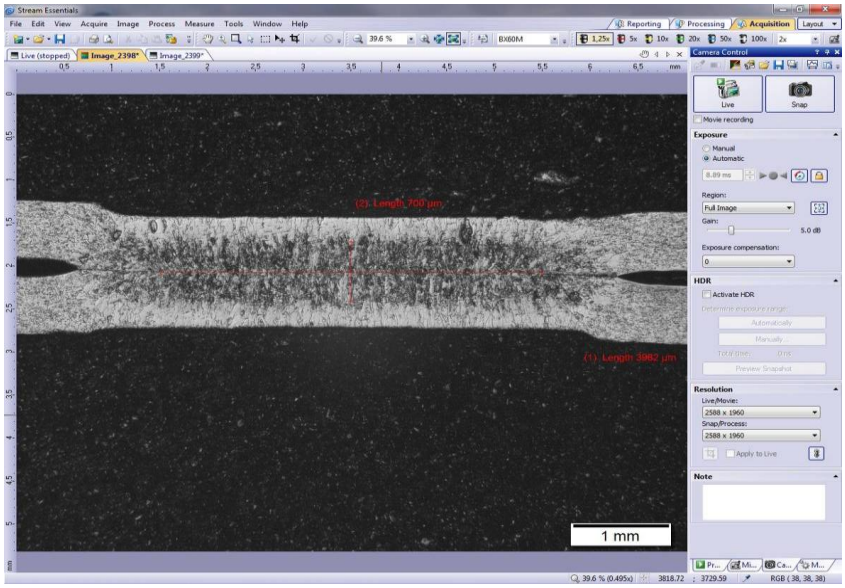


Figura III.14 – Medição da lente de solda, através do *software* OLYMPUS STREAM ESSENTIALS.

A análise microestrutural da junta soldada tem como principal finalidade avaliar a microestrutura do aço nas regiões da lente de solda, da zona termicamente afetada e do metal base. Essa análise foi realizada através dos processos de microscopia óptica (MO) e microscopia eletrônica de varredura (MEV).

Para a avaliação da redução da camada superficial das chapas de aço IF galvanizadas, através da técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) foi utilizado um microscópio eletrônico de varredura (MEV), da marca: FEI, modelo Inspect S50, no Centro de Caracterização em Nanotecnologia – CENANO, no Instituto Nacional de Tecnologia – INT, unidade de pesquisa do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação.

Para verificar a ordem de grandeza de alguns dos principais elementos de liga presentes nas mais diversas regiões microestruturais da junta soldada foram obtidas análises por espectrometria de energia dispersiva (EDS) pontualmente no Metal Base (*Base Metal*), na Zona Termicamente Afetada (*Heat Affect Zone*) e na Lente de solda (*Welding Nugget*), para as amostras com os conjuntos de parâmetros avaliados: 2300*N*, 13*cy,* 51%; 2300*N*, 13*cy*, 52%; 2300*N*, 13cy e 53%.

III.9. Ensaio de microdureza.

O ensaio de dureza é realizado para verificar a resistência à penetração de um indentador, fixado em um equipamento chamado de Durômetro, na superfície do corpo de prova. A norma ANSI/AWS/SAE/D8.9-97 recomenda que o ensaio de dureza Vickers, a fim de verificar os diferentes valores da dureza microestrutural, nas três principais regiões da junta soldada, metal base, zona termicamente afetada e lente de solda, , conforme apresentado na figura III.15, para as amostras com os melhores conjuntos de parâmetros avaliados.

O ensaio de dureza Vickers foi realizado, conforme a norma adotada, que recomenda a marcação de uma linha diagonal em uma seção transversal do ponto de solda para o ensaio de microdureza para verificar os diferentes valores de dureza nas principais regiões microestruturais do ponto de solda.

Os diferentes valores da dureza nas três principais regiões na microestrutura da junta soldada são resultado da composição química do aço IF e das diferentes microestruturas encontradas em cada uma dessas regiões, que são dependentes dos parâmetros de soldagem utilizados no processo de soldagem a ponto por resistência.

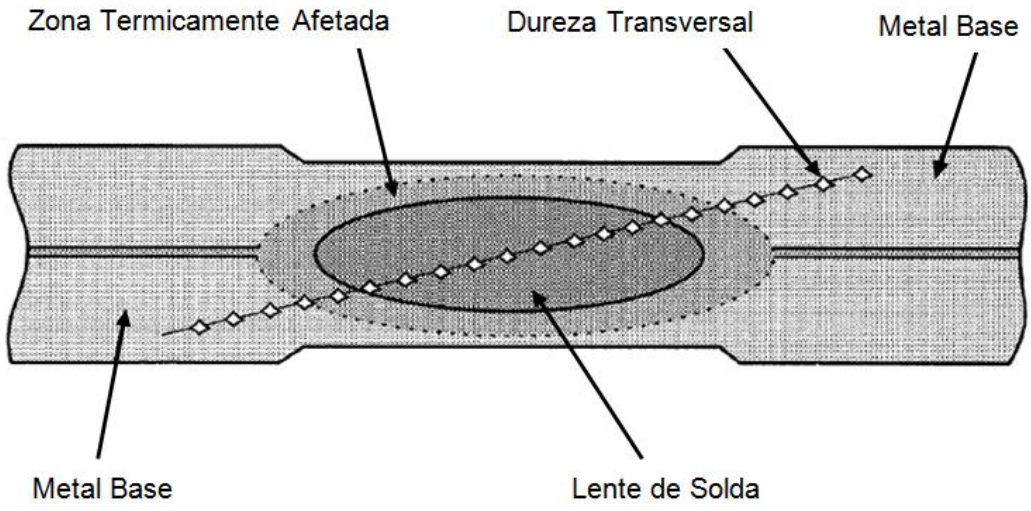


Figura III. 15 – Indicação da linha de marcação na seção transversal do ponto de solda. Adaptado da norma ANSI/AWS/SAE/D8.9-97.

Portanto, os valores encontrados nesse ensaio fornecem dados importantes sobre as propriedades do material de forma rápida, sendo este um dos ensaios mais utilizados para a verificação de dureza do material, na indústria como parte dos requisitos de controle de qualidade (PENTEADO, 2011).

Capítulo IV – Resultados e Discussão

IV.1. Avaliação dos resultados dos ensaios mecânicos.

Durante a fase inicial desse trabalho foi realizado um levantamento dos principais trabalhos publicados sobre o tema de avaliação de parâmetros de soldagem a ponto por resistência, para a união de chapas de aço galvanizadas, a fim de verificar a variação dos valores dos parâmetros empregados pela indústria automotiva.

Segundo KAVAMURA (2007), entre os principais os ensaios mecânicos destrutivos existentes, o mais empregado para avaliação da qualidade do ponto de solda é o ensaio estático de cisalhamento (*tensile shear*), devido a sua simplicidade e baixo custo.

Na realização dos ensaios de cisalhamento para avaliar a resistência ao cisalhamento dos pontos de solda em chapas metálicas empregadas pela indústria automotiva é recomendado a utilização da norma ANSI/AWS/SAE/D8.9-97 (GOODARZI *et al.*, 2009).

Portanto, a partir da avaliação dos conjuntos de parâmetros de soldagem utilizados pelos demais autores, na união chapas de aço baixo carbono livre de intersticiais e também dos parâmetros mais utilizados pelas montadoras da indústria automotiva, foram selecionados os conjuntos de parâmetros de soldagem a ponto que são utilizados nesta dissertação, esses parâmetros selecionados estão apresentados na tabela IV.1:

Tabela IV.1.: Conjuntos parâmetros de soldagem selecionados nesta dissertação.

Parâmetros de Soldagem a ponto por resistência (RSW)	
Força dos eletrodos (N)	2300*N*
Potência elétrica da máquina (%)	48% a 53%
Corrente de Soldagem (kA)	7,0*kA* a 8,5*kA*
Tempo de Soldagem (cy)	13*cy*
Tempo de Soldagem (s)	3,34*s*

A partir da avaliação dos resultados dos ensaios foram selecionadas as melhores amostras, respeitando critérios de diâmetro crítico do ponto de solda. Estas amostras foram soldadas com a potência elétrica da máquina de solda variando entre 50% a 53% (7,5*kA* a 8,5*kA*) conforme as recomendações da Norma ANSI/AWS/SAE D8.9-97, conforme figura IV.1.

IV.1.1. Resultados dos ensaios de cisalhamento

Os valores registrados nesses ensaios, para as juntas soldadas com os conjuntos de parâmetros: 2300*N*, 13*cy*, 48% / 2300*N*, 13*cy*, 49% não estão apresentados a seguir, pois foi verificado, através da técnica de microscopia ótica, que não ocorreu a fusão completa do aço IF, na região de formação da lente de solda (*Welding Nugget*), consequentemente, não houve a formação de um ponto de solda (*Spot Welding*) com características aceitáveis pelas normas de qualidade utilizadas pela indústria automobilísitca.

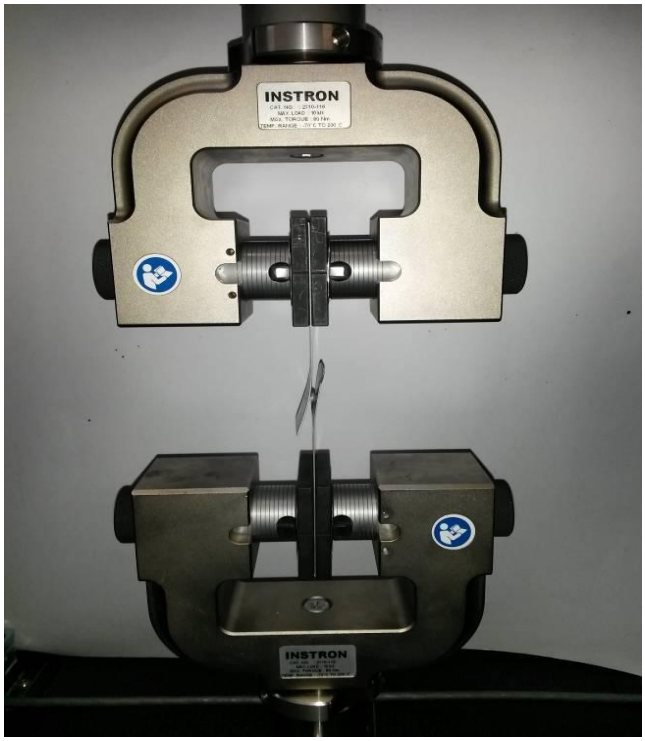


Figura IV.1 – Ensaio de cisalhamento de um corpo de prova utilizado nos experimentos.

A seguir estão apresentados os resultados do ensaio de cisalhamento realizados em quatro amostras, com dimensões sugeridas pela norma adotada, para cada um dos principais conjuntos de parâmetros, conforme apresentados na tabela IV.2:

Tabela IV.2.: Valor do carregamento médio (Força) encontrado no ensaio tração da junta soldada, para as amostras com o conjunto de parâmetros selecionados.

Potência Elétrica	Carregamento Médio	Desvio Padrão	Corrente de Soldagem	Desvio Padrão
50%	2,406*kN*	259	7,490*kA*	0
51%	3,079*kN*	79	7,720*kA*	0,04
52%	3,160*kN*	135	8,040*kA*	0,03
53%	3,257*kN*	74	8,380*kA*	0,086

Ao realizar o ensaio de cisalhamento foi verificado que o maior valor de carregamento de cisalhamento de 3333*N* foi encontrado soldada com o conjunto de parâmetros de 13*cy*, 2300*N* e 53% da potência elétrica. Contudo, esse valor é muito próximo ao carregamento máximo de 3327*N,* encontrado para a amostra soldada com o conjunto de parâmetros de 13*cy*, 2300*N* e 52% da potência, conforme apresentado no gráfico da figura IV.2.

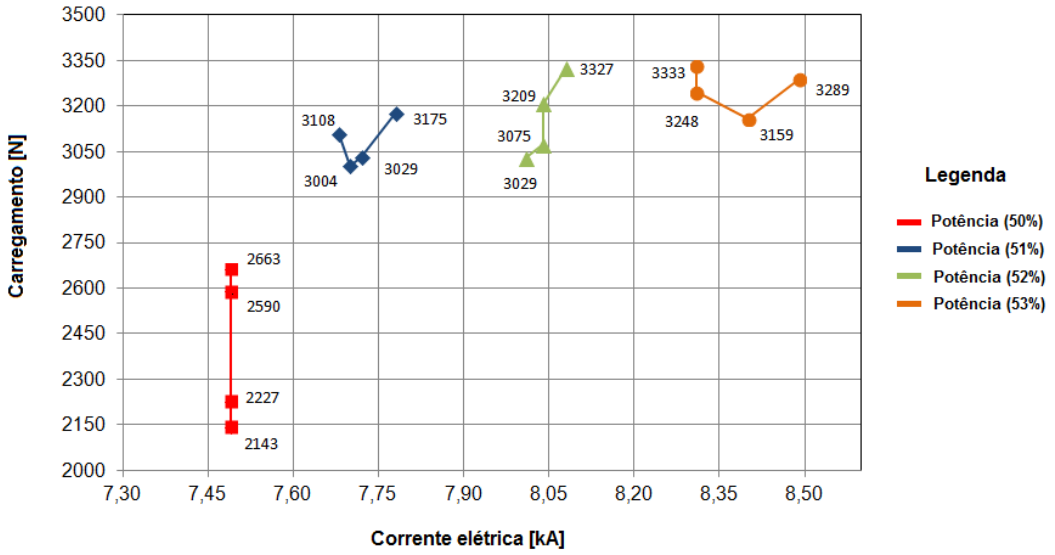


Figura IV.2 – Resultados dos valores de carregamento no ensaio de cisalhamento.

No gráfico apresentado na figura IV.3 foram selecionados 30 pontos registrados pelo *software* "*Blue Hill 3*", para a verificação do espalhamento dos resultados de carregamento em função do tempo, a fim de avaliar a similaridade do comportamento da curva plotada para as amostras com a melhor combinação com o conjunto de parâmetros: 2300*N*, 13*cy* e 52%.

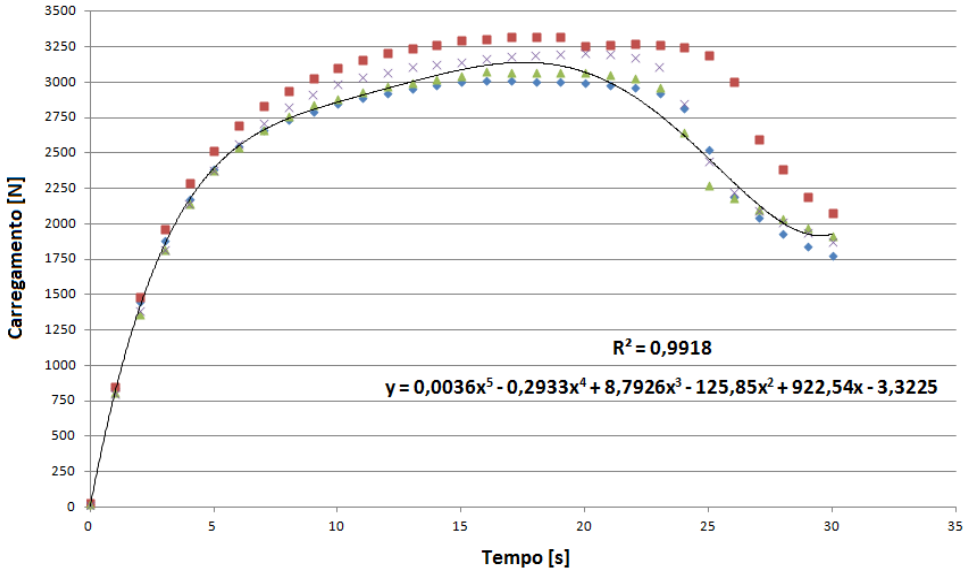


Figura IV.3 – Gráfico "Carregamento *versus* Tempo" das amostras com de parâmetros: 2300*N*; 13*cy* e 52%.

Os modos de falha observados por ZHOU *et al.* (1999) para avaliação do tipo de fratura da junta soldada após a realização dos ensaios de tração em cada amostras podem ser observados a partir da análise da curva “força *versus* deslocamento”, apresentadas nos gráficos das figuras IV.4.

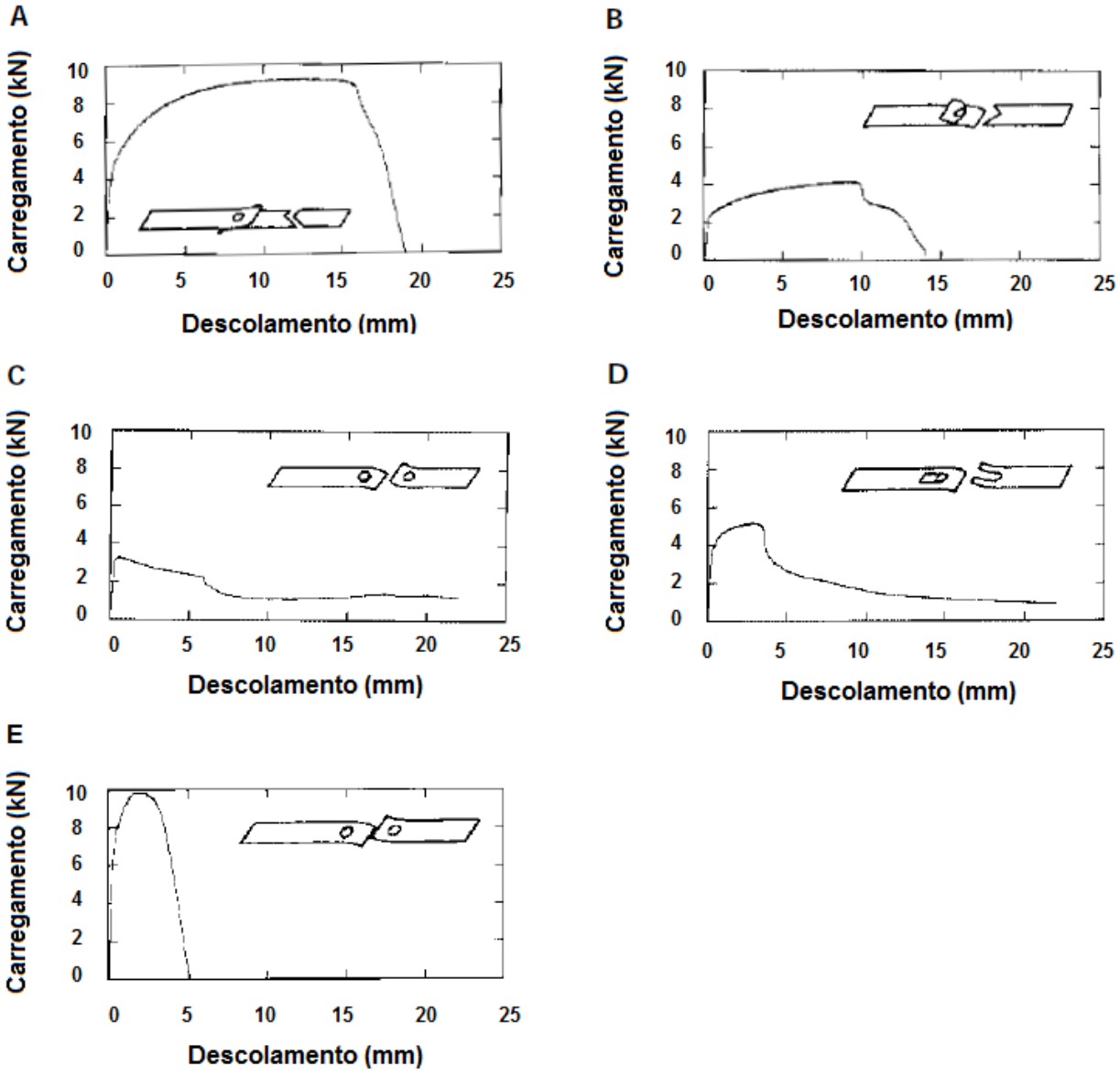


Figura IV.4 – Curvas de carregamento *versus* deslocamento para verificação do modo de falha do ponto de solda. Fonte: Adaptado de ZHOU *et al.* (1999).

Ao avaliar os modos de falha A e B observados por ZHOU *et al.* (1999), apresentados em ensaios de tração estáticos foi verificada ocorrência de falha na região do material base (MB) da junta soldada. Nesse caso, essa falha é gerada pelo rompimento da chapa metálica, com isso não é possível avaliar o tipo de fratura.

No modo de falha C, (ZHOU *et al.*, 1999), não houve a ocorrência de uma falha na região do material base, conforme pode ser observado na figura IV.8. Nesse caso, a falha ocorre pelo destacamento do ponto de solda na região da ZTA, com isso é possível avaliar qual o tipo de fratura da junta soldada pelo processo de soldagem a ponto por resistência. Por outro lado, para o modo de falha por cisalhamento D, mostrado na figura IV.10, ocorre o destacamento completo do ponto de solda na ZTA, associado à alta resistência do ponto, apresentando o rasgamento da chapa metálica. Esse modo de falha é esperado nos projetos de carrocerias de veículos automotivos.

O modo de falha E, observado por ZHOU *et al.* (1999) é decorrente do colapso do ponto na interface da região soldada, associado à alta resistência do ponto, não apresentando o rasgamento da chapa metálica. Na maioria das aplicações do processo de soldagem a ponto por resistência esse modo de falha é o mais desejado para a maioria das aplicações automotivas em geral.

Nota-se que após o ensaio de cisalhamento das amostras com parâmetros de 48% (7,15*kA*) e 49% (7,69*kA*) de potência elétrica da maquina de soldagem a ponto por resistência, não houve formação da lente de solda, conforme evidenciado na figura IV.5.

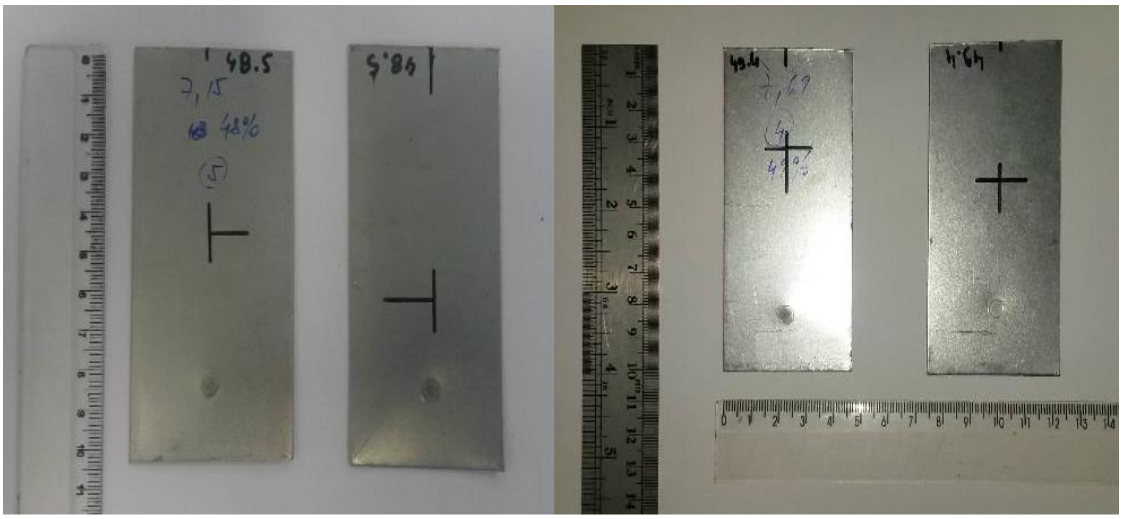


Figura IV.5 – Impressões do ponto de solda após o ensaio de cisalhamento.

Para as amostras soldadas com o conjunto de parâmetros: 2300*N*, 13*cy* e 50% foi verificado o fenômeno conhecido como “solda fria”, onde ocorre a fusão do aço de forma parcial na região da lente de solda. Nota-se que somente a amostra número 3 apresentou modo de falha por arrancamento do ponto, decorrente do destacamento do ponto de solda na região da ZTA, conforme evidenciado na figura IV.6. As demais amostras do mesmo grupo em questão apresentaram modo de falha interfacial, conforme mostrado na figura IV.7.

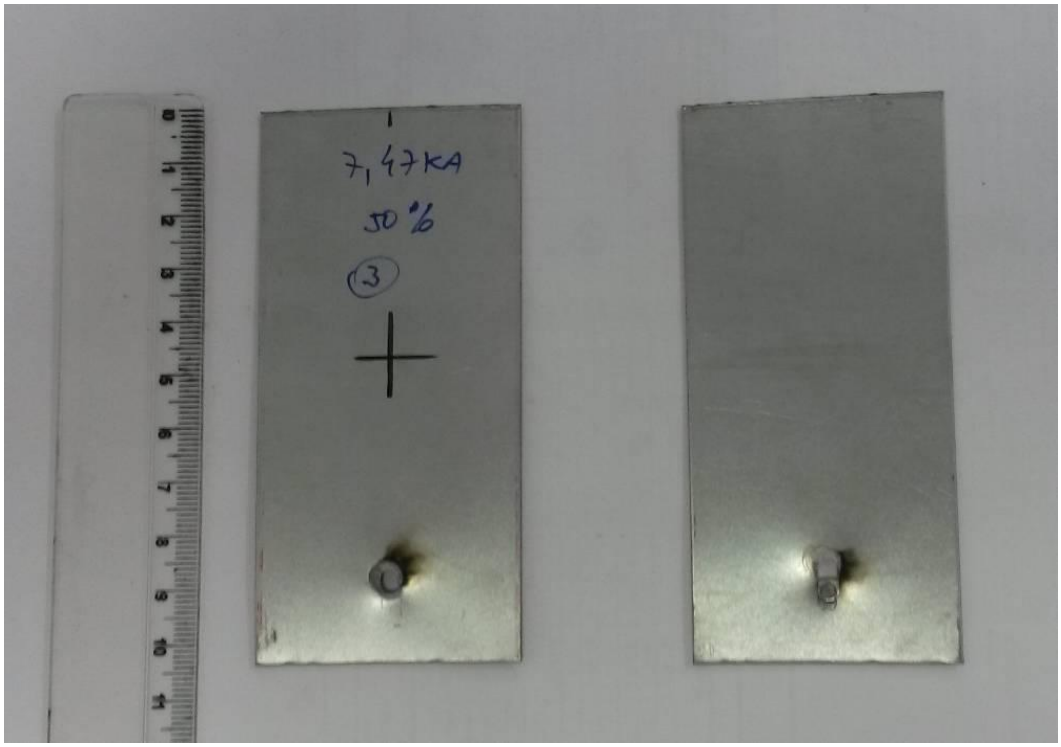


Figura IV.6 – Corpo de prova nº 3 soldado com os parâmetros: 2300*N*, 13*cy* e 7,47*kA.*

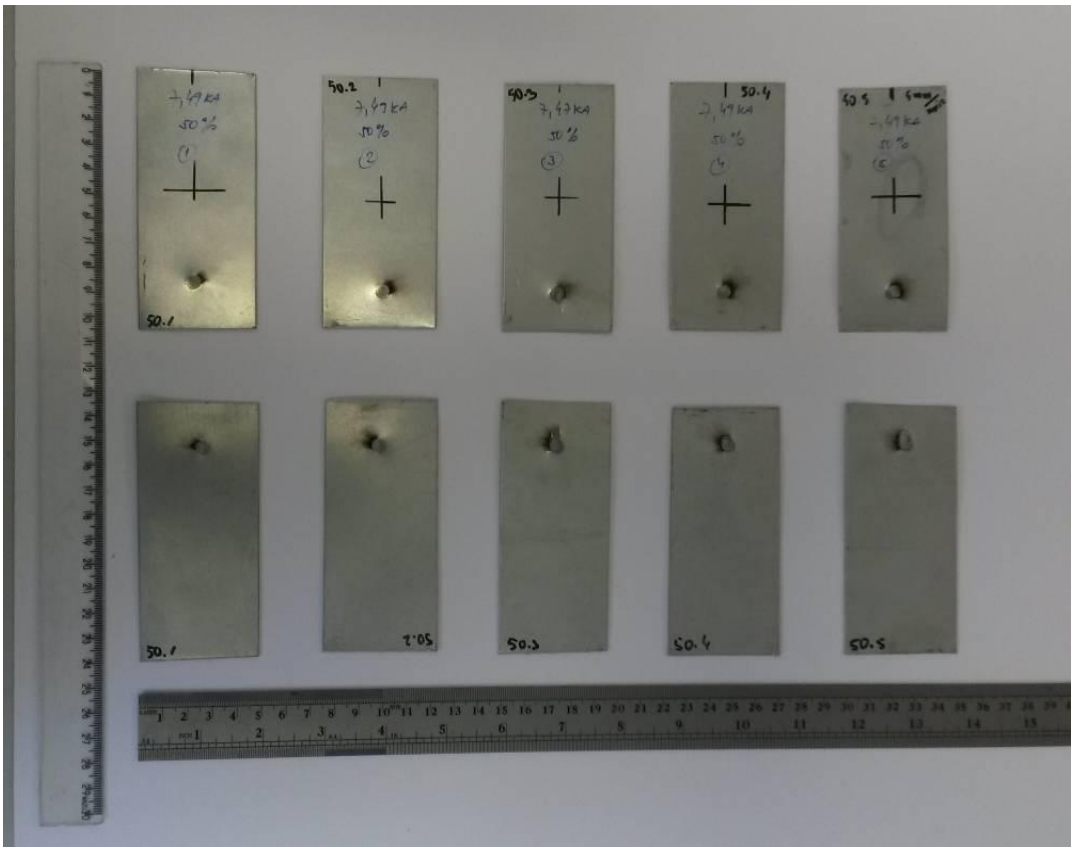


Figura IV.7 – Corpos de prova soldados com os parâmetros: 2300*N*; 13*cy*; 50% de potência.

As figuras IV.8, IV.9 e IV.10, respectivamente, apresentam amostras as juntas soldadas com a seguinte combinação de parâmetros de soldagem: 2300*N*; 13*cy*; 51% / 2300*N*; 13*cy*; 52% / 2300*N*; 13*cy*; 53%. Ao avaliar os corpos de prova, após os ensaios de cisalhamento, foi verificado o destacamento completo do ponto de solda, associado à alta resistência do ponto, apresentando o rasgamento da chapa metálica.

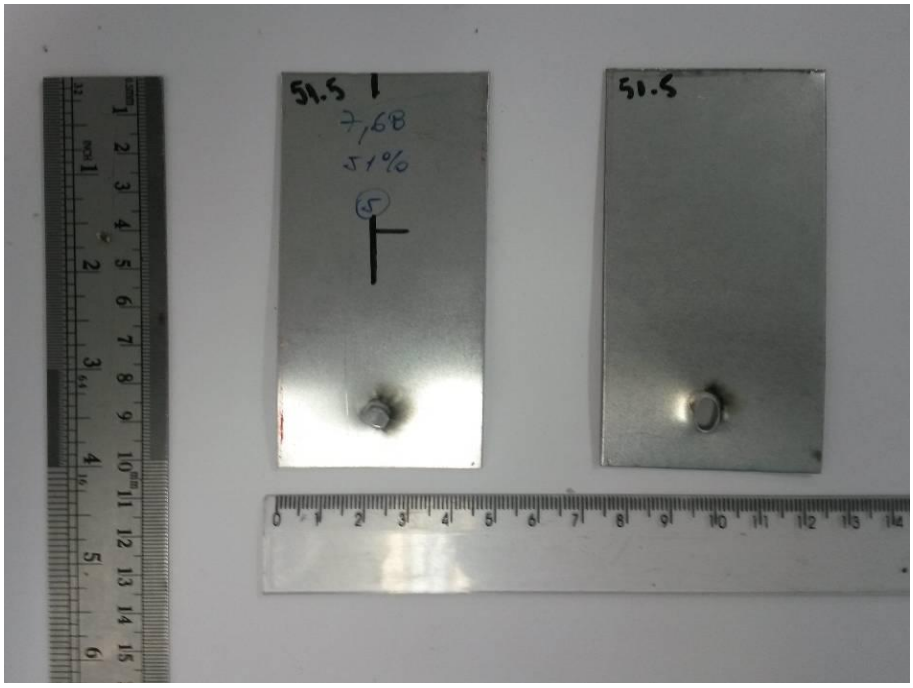


Figura IV.8 – Corpo de prova nº 5 soldado com os parâmetros: 2300*N*; 13*cy e* 7,68*kA*.

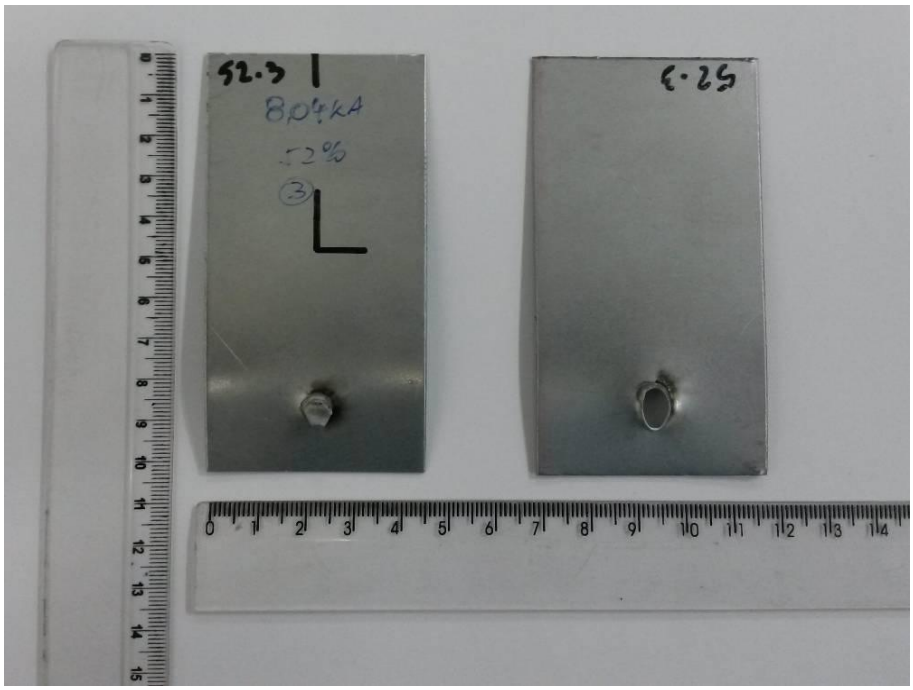


Figura IV.9 – Corpo de prova nº 3 soldado com os parâmetros: 2300*N*; 13*cy* e 8,04*kA*.

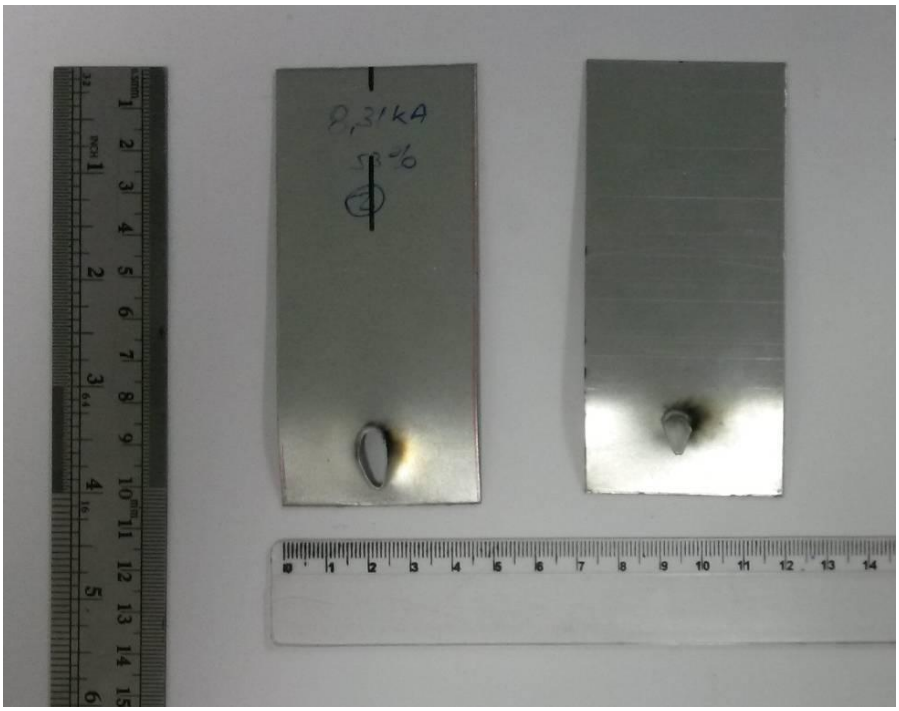


Figura IV.10 – Corpo de prova nº 2 soldado com os parâmetros: 2300*N*; 13*cy* e 8,31*kA*.

Segundo ZHOU *et al.* (1999), esses resultados apresentados são semelhantes ao esperado nos projetos de carrocerias de veículos, pois é possível avaliar o tipo de fratura das juntas soldadas através do processo de soldagem a ponto por resistência, a partir da avaliação do modo de falha por cisalhamento, apresentando o rasgamento da chapa metálica nos corpos de provas, conforme evidenciado nos corpos de prova mostrados nas figuras anteriores.

Segundo AMARAL (2009), os modos de falha podem ser classificados em: (a) Modo de falha interfacial, (b) Modo de falha por arrancamento do ponto, (c) Modo de falha por rasgamento da chapa, (d) Modo de falha por arrancamento do ponto com rasgamento da chapa, conforme comparação do modo de falha dos pontos de solda mostrados na figura IV.11.

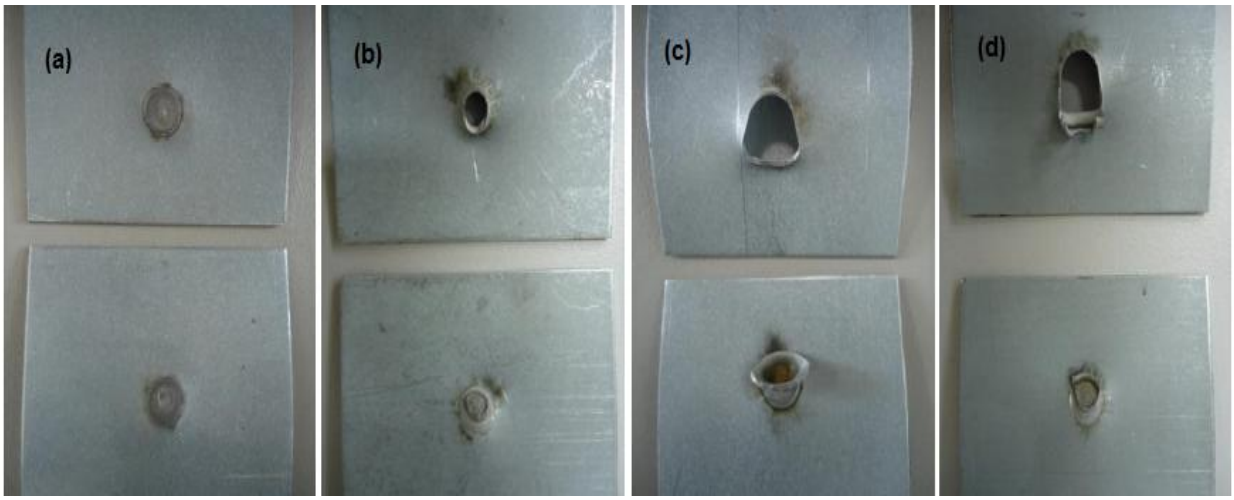


Figura IV.11 – Comparação do modo de falha do ponto de solda. Fonte: AMARAL (2009).

IV.1.2. Resultados dos ensaios de arrancamento

Existem muitas normas adotadas pela indústria automotiva, que recomendam um tamanho mínimo do ponto de solda, em relação a espessura das chapas metálicas soldadas, obtidos através dos resultados encontrados nos ensaios de arrancamento. Esse ensaio é muito importante para verificar se as dimensões do ponto de solda estão em conformidade com os valores críticos determinados pela norma ANSI/AWS/SAE D8.9-97. Na figura IV.12 é apresentado o corpo de prova, amostra nº 1, soldado com os parâmetros: 2300*N*, 13*cy* e 52%, após o ensaio de arrancamento.



Figura IV.12 – Corpo de prova com os parâmetros: 13*cy*; 52%, após o ensaio de arrancamento.

Os resultados do ensaio de arrancamento, de acordo com as recomendações da norma AWS D8.9-97 estão apresentados na tabela IV.3. Nessas tabelas estão registrados os valores dos diâmetros: máximo, mínimo e médio, em função da combinação dos melhores parâmetros de soldagem selecionados para 3 (três) amostras distintas, escolhidas aleatoriamente.

Tabela IV.3: Dimensões do ponto de solda encontradas, após o ensaio de arrancamento da junta soldada com o conjunto de parâmetros selecionados.

Tamanho do ponto de solda em função da corrente de soldagem				
Potência Elétrica	**Diâmetro Médio**	**Desvio Padrão**	**Corrente de soldagem**	**Desvio Padrão**
51%	3,384*mm*	0,052	7,783*kA*	0,035
52%	3,942*mm*	0,128	8,043*kA*	0,102
53%	4,533*mm*	0,144	8,340*kA*	0,096

Portanto, a partir da avaliação dos resultados do diâmetro médio verificados nos ensaios de arrancamento, para os melhores conjuntos de parâmetros de soldagem selecionados, pode-se observar no gráfico da Figura IV.13, que somente as amostras com a combinação dos parâmetros: 2300*N*, 13*cy*, 52% estão de acordo com os critérios ótimos das curvas de soldabilidade, recomendados pela a norma AWS D8.9-97 utilizada nesta dissertação. Esta norma recomenda valores mínimos de 3,464*mm* e máximos de 4,330*mm*.

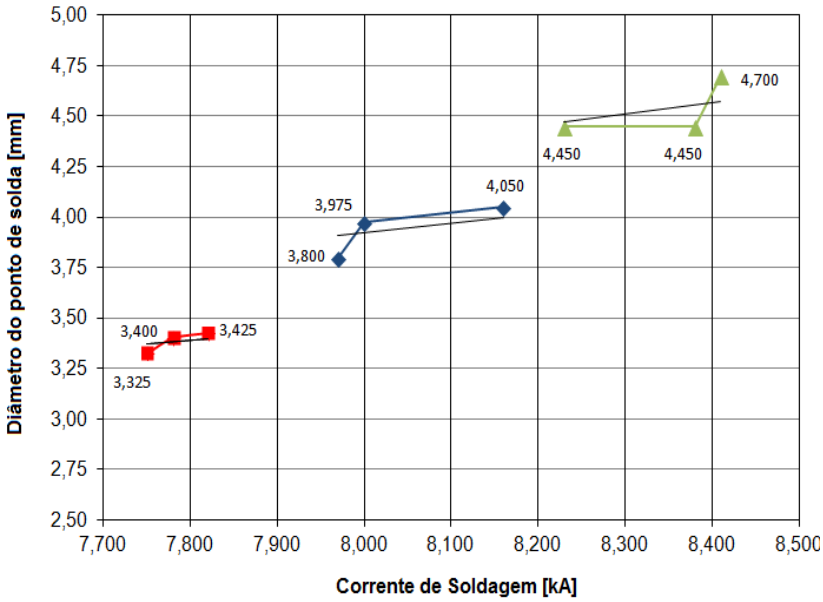


Figura IV.13 – Gráfico apresentando o "Diâmetro do ponto de solda *versus* corrente de soldagem" dos melhores conjunto de parâmetros de soldagem selecionados.

GOODARZI *et al.* (2009), em um dos experimentos foi fixado o tempo de soldagem em 10*cy* e com a corrente de soldagem variando entre 10 a 12,5*kA* e no outro experimento foi fixada a corrente de soldagem em 11,5*kA* e variou o tempo de soldagem entre 8 a 14*cy*, para determinar a dimensão do tamanho do diâmetros da lente de solda, em chapas de aço de baixo carbono com 1,1*mm* de espessura, conforme gráfico apresentado na figura IV.14.

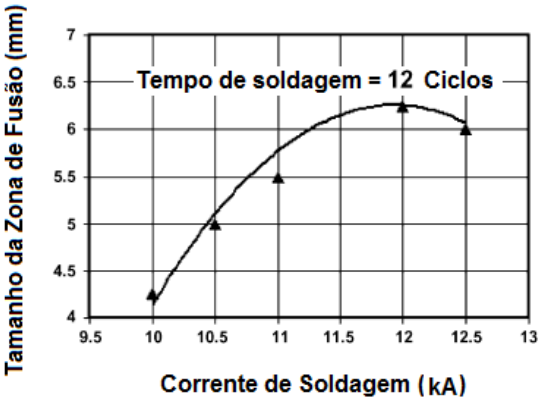


Figura IV.14 – Gráfico do tamanho da zona de fusão em função da corrente de soldagem. Adaptado de GOODARZI *et al.* (2009).

IV.1.3. Resultados dos ensaios de dureza Vickers.

No ensaio de dureza Vickers utilizando uma carga pré-determinada de 200 gf, através do penetrador de diamante, conforme as recomendações da norma AWS D8.9-97 foi verificado que a resistência mecânica do ponto de solda está relacionada com o tamanho do diâmetro da lente de solda, consequentemente, ocorre o aumento do limite de resistência, onde foi verificado o maior aumento de dureza na junta soldada, conforme mostrado na figura IV.15.

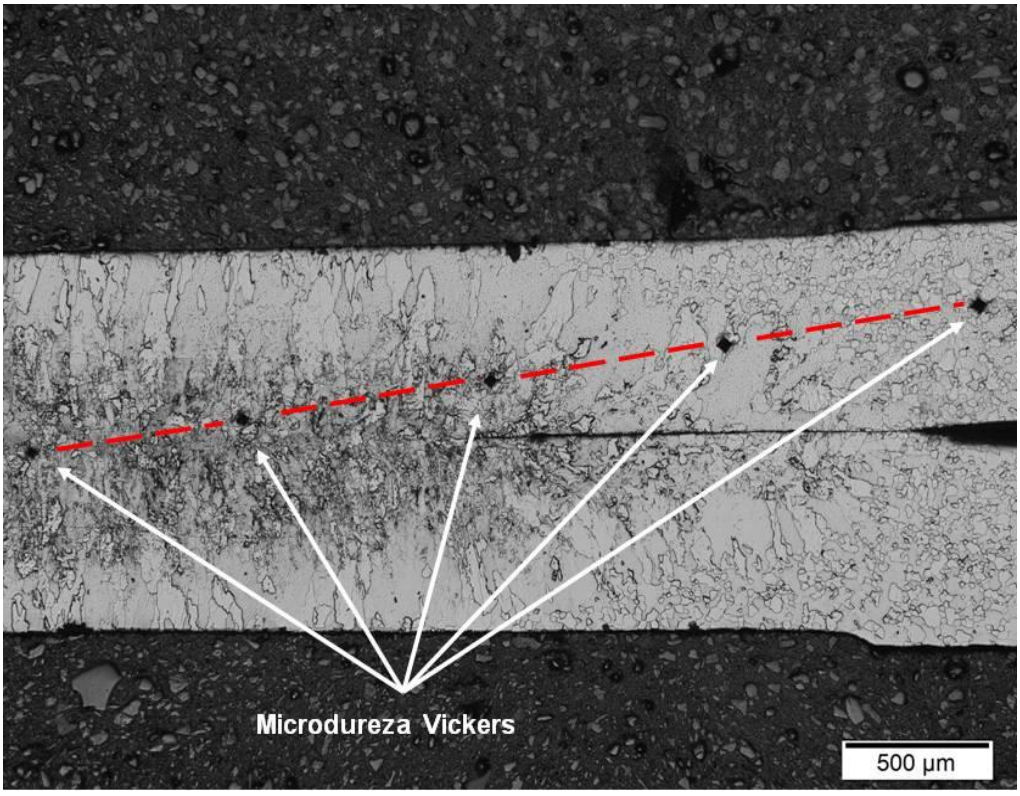


Figura IV.15 – Indicação dos pontos de microdureza Vickers na lente da seção transversal da solda com parâmetro de solda de: 2300*N*, 13*cy* e 51% para o ensaio de dureza Vickers.

Segundo os autores PODRŽAJ *et al.* (2008) e POURANVARI *et., al*. (2013), os valores de dureza obtidos pelo do ensaio de microdureza Vickers, na região da lente de solda estão diretamente ligados a resistência mecânica da junta soldada através dos parâmetros selecionados no processo de soldagem por resistência a ponto.

Nas figuras IV.16, IV.17, IV.18, IV.19 estão apresentados os gráficos de “Dureza Vickers *versus* Distância do centro da lente de solda”, apresentando os resultados verificados para este trabalho, com os valores de microdureza encontrados para os seguintes parâmetros de soldagem selecionados: Força de pinça: 2300N, Templo de soldagem de 13 cy e corrente de soldagem variando de 7,0 kA a 8,5 kA, com potência elétrica da máquina de soldagem a ponto por resistência variando entre 51% a 53%.

No primeiro caso avaliado, conforme o gráfico apresentado na figura IV.16, a partir do parâmetro de soldagem selecionado de 13 cy e potência entre 51% foi observado que o valor máximo da microdureza na região da lente de solda é de 188,30HV e o menor valor encontrado na região de metal base (MB) é 98,30HV.

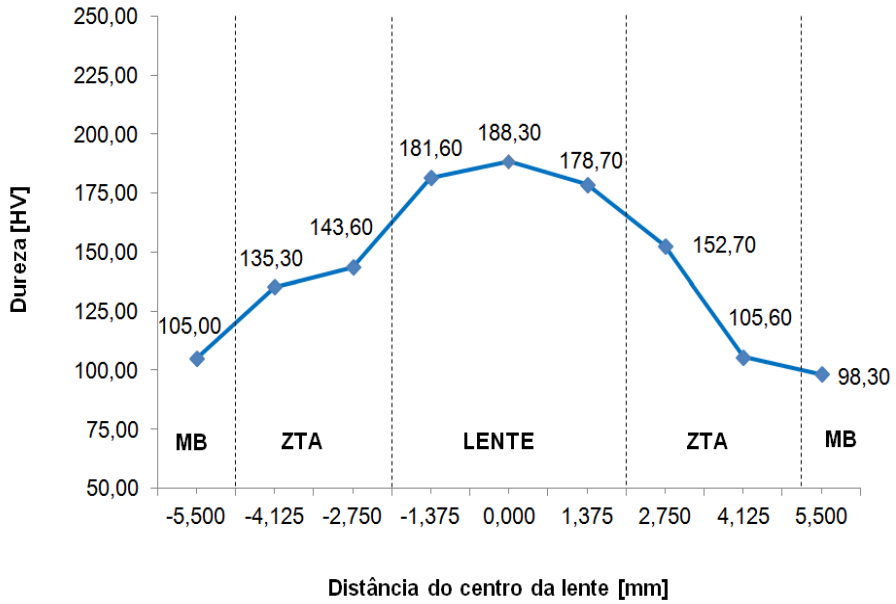


Figura IV.16 – Dureza medida nas principais regiões do ponto de solda para as condições com parâmetros de potência da máquina de solda em 51%.

Foi verificado que os valores de dureza obtidos pelo do ensaio de microdureza Vickers encontrados para a região da lente de solda, de aproximadamente 188HV, e para a região de metal base, na ordem de 100HV são semelhantes aos valores apresentados por MUKHOPADHYAY (2010) nos ensaios de microdureza em aços IF de composição química similar ao utilizado nas juntas soldadas deste trabalho.

A partir da análise do gráfico com os resultados apresentados para a amostra soldada com parâmetro de potência da máquina de solda em 51% foi verificada uma redução no valor da microdureza na região da Zona Termicamente Afetada (ZTA).

Por outro lado, na região de metal base os valores de dureza encontrados estão na faixa de 98HV e 105HV e na região de lente de solda esses valores estão na faixa de 178HV e 188HV, portanto, em ambas as regiões não apresentam elevada variação se comparado com a região da ZTA.

Para potência elétrica da máquina de solda de 52%, conforme o gráfico apresentado na figura IV.17, foi observado que o valor máximo da microdureza na região da lente de solda é de 211,70HV e o menor valor encontrado na região de metal base (MB) é 98,30HV.

A partir da análise do gráfico da figura IV.17, foi verificado um aumento significativo do valor da microdureza na região da Zona Termicamente Afetada (ZTA), próxima à região da lente de solda. Por outro lado, na região de interface com o metal base, esses valores de dureza apresentaram uma grande queda em relação aos valores encontrados na região da lente de solda.

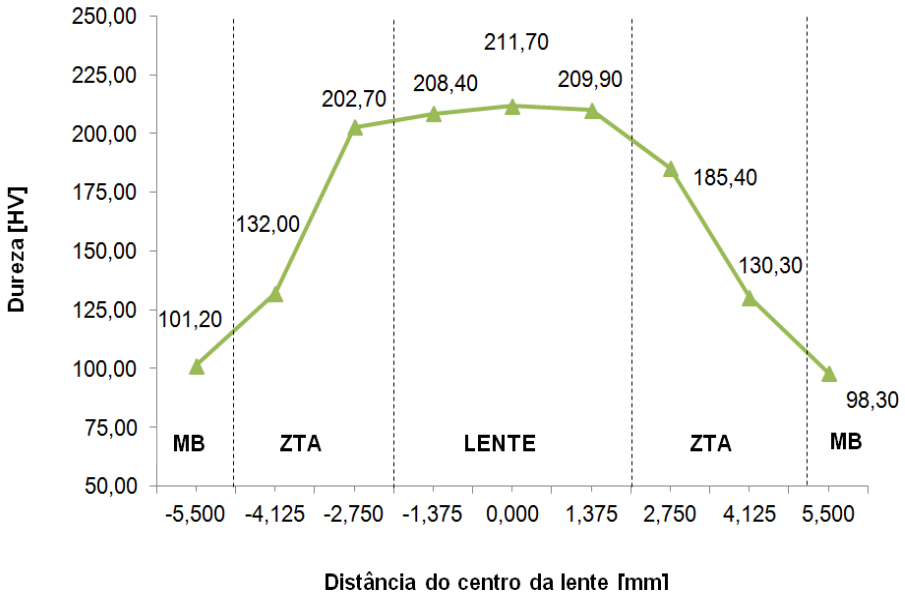


Figura IV.17 – Dureza medida nas principais regiões do ponto de solda para as condições com parâmetros de potência da máquina de solda em 52%.

Para potencia de 53%, conforme o gráfico apresentado na figura IV.18, foi observado que o valor máximo da microdureza na região da lente de solda é de 196,00HV e o menor valor encontrado na região de metal base (MB) é 90HV.

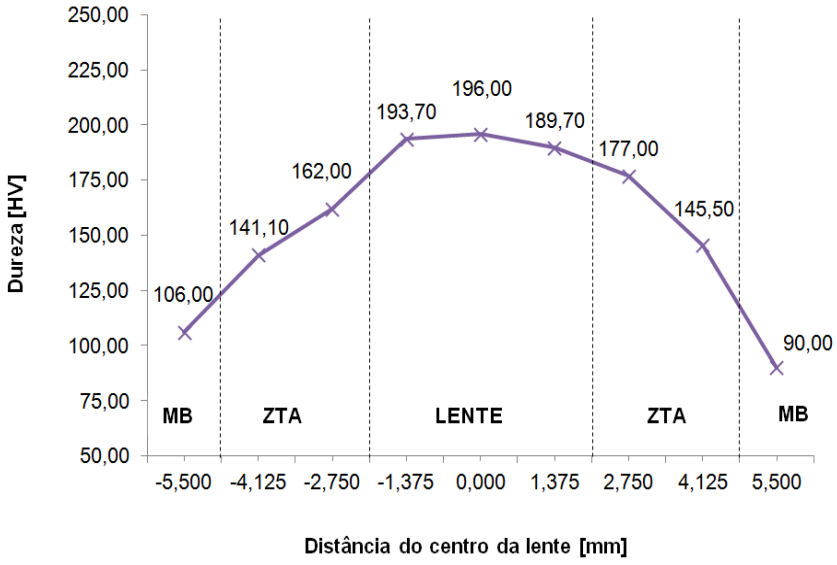


Figura IV.18 – Dureza medida nas principais regiões do ponto de solda para as condições com parâmetros de potência da máquina de solda em 53%.

A partir da análise do gráfico apresentado na figura IV.19 foi verificado em todos os casos que os valores de dureza apresentaram-se na faixa de valores entre 90HV e 106 HV, na região de metal base. Por outro lado, foi verificado um aumento significativo do valor da microdureza na região da lente de solda nas amostras avaliadas.

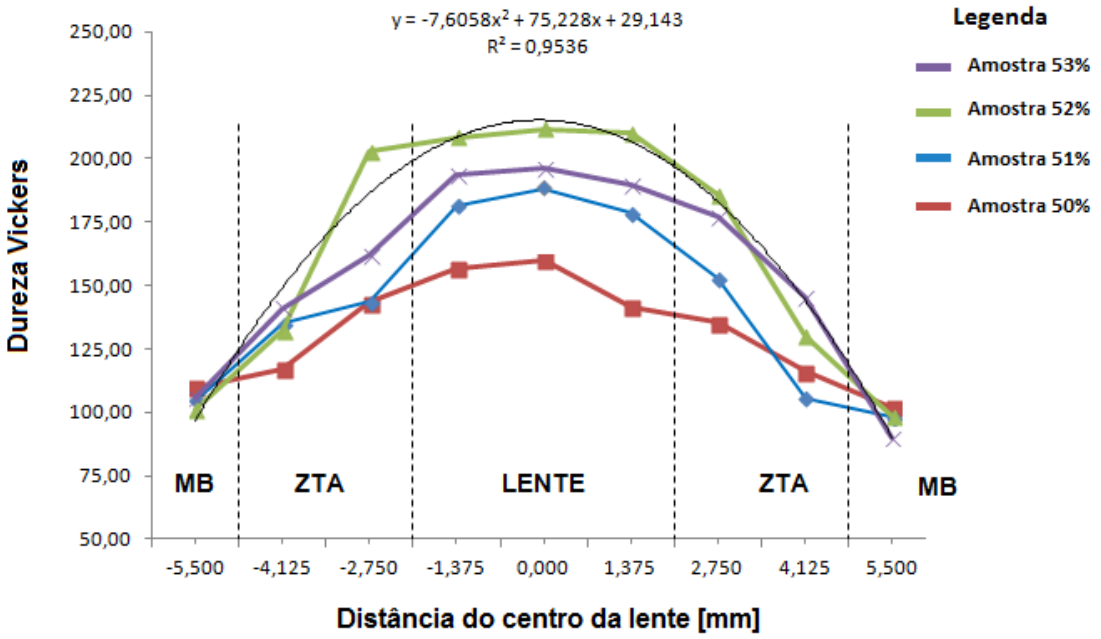


Figura IV.19 – Dureza medida nas principais regiões do ponto de solda para as condições com parâmetros de potência da máquina de solda em 50%, 51%, 52%, 53% e 53%.

GOODARZI *et al*. (2009), verificaram a partir dos ensaios de microdureza Vickers, a ocorrência de diferentes valores de dureza, obtidos nas regiões da lente de solda, zona termicamente afetada e do metal base da junta soldada pelo processo de soldagem a ponto por resistência, para a união de chapas de aço galvanizado baixo carbono, para parâmetros de corrente de soldagem de 7 kA e ciclo de soldagem de 12*cy* e concluíram a partir dos ensaios de microdureza Vickers que, o valor de dureza na região da lente de solda é 2,4 vezes que na região de metal base da junta soldada.

CHAKRABORTY *et al.* (2011) verificaram diferentes valores de dureza, obtidos nos ensaios de microdureza Vickers, nas 3 principais regiões da junta soldada de chapas de aço IF de baixo carbono galvanizado, que apresentam em sua composição química 0,0035% de Carbono. Foram utilizados neste trabalho os parâmetros de 2800*N*, 7 kA e 12 cy.

DIAS (2011), verificou que a dureza na região da lente foi próxima de 180HV e no metal base foi da ordem de 100HV, em chapas de aço IF, com espessura de 0,75*mm,* para os parâmetros de soldagem selecionados: 8*cy* e 52%; 9*cy* e 51%; 9*cy* e 52%; 10*cy* e 51%. Os valores encontrados na região de metal base são similares ao encontrado neste trabalho.

IV.2. Avaliação microestrutural.

IV.2.1. Microscopia ótica

A seguir, foi possível observar, através da técnica de microscopia ótica (MO), as principais estruturas micrográficas do Metal Base (MB), Zona Termicamente afetada (ZTA) e a zona de fusão (LENTE), nas secções dos pontos de solda, com os seguintes conjuntos de parâmetros selecionados: 2300*N*, 13cy e 53%; 2300*N,* 13*cy*, 52%; 2300*N*, 13*cy,* 51%; conforme evidenciado respectivamente nas figuras IV.20, IV.21 e IV.22.

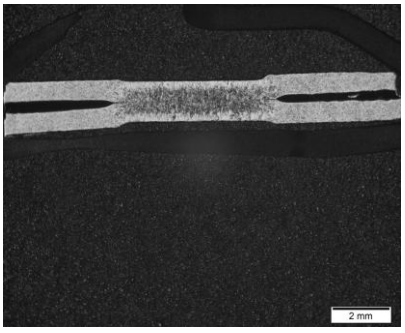


Figura IV.20 – Seção transversal de um ponto de solda, com formação da lente de solda, com parâmetros de 2300*N*, 13*cy* e 53%. Aumento de 12,5x. Ataque NITAL 10%.

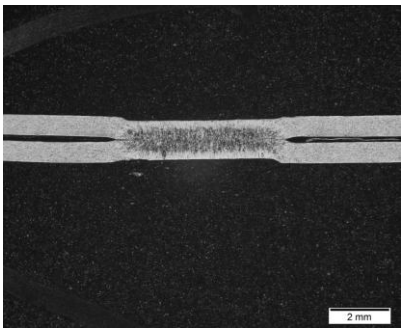


Figura IV.21 – Seção transversal de um ponto de solda, com formação da lente de solda, com parâmetros de 2300*N*, 13*cy* e 52%. Aumento de 12,5x. Ataque NITAL 10%.

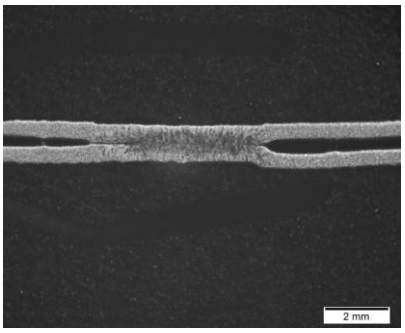


Figura IV.22 – Seção transversal de um ponto de solda, com formação da lente de solda, com parâmetros de 2300*N*, 13*cy* e 51%. Aumento de 12,5x. Ataque NITAL 10%.

Ao avaliar a macrografia da seção transversal de um ponto de solda, através da técnica de microscopia ótima (MO) da região soldada com o conjunto de parâmetros: 2300*N*, 13cy e 50%, conforme apresentada na figura IV.42, foi possível observar uma má formação da lente de solda, além de evidenciar que as chapas não estão soldadas de forma adequada para os elevados padrões da qualidade adotados na indústria automobilística.

Contudo, foi verificado para as amostras soldadas com o parâmetro de 50% de potência da máquina, através da técnica de microscopia ótica (MO), que o fenômeno supracitado deve-se ao defeito conhecido como “solda fria”, quando o metal em estado líquido não se une em função da baixa temperatura, assim diminui a resistência mecânica do aço, favorecendo a ocorrência e propagação de trincas externas e internas.

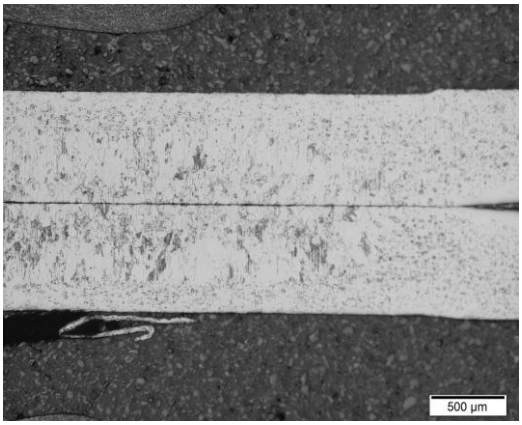


Figura IV.23 – Seção transversal de um ponto de solda, com aumento de 50x, apresentando uma má formação da lente de solda, a partir dos parâmetros: 2300*N*; 13*cy* e 50%.

Portanto, as possíveis causas para este tipo de defeito (solda fria) ocorre devido a baixa corrente elétrica de soldagem e a excessiva força de fechamento dos eletrodos. Por isso, conforme observado na figura IV.42, a região central da zona de fusão apresenta uma área não solidificada devido ao aquecimento insuficiente da região.

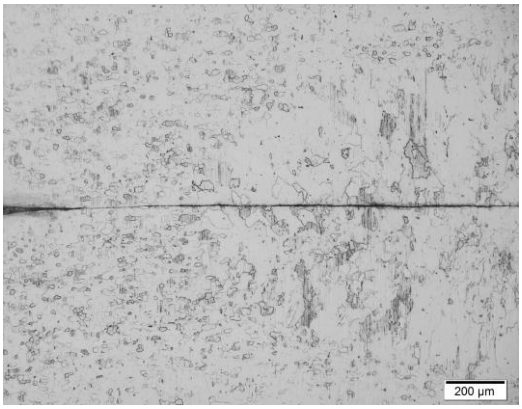


Figura IV.24 – Seção transversal de um ponto de solda, com aumento de 100x, apresentando uma má formação da lente de solda, a partir dos parâmetros de 2300*N*, 13*cy* e 50%.

Esse fato pode gerar interpretações erradas principalmente nos ensaios não destrutivos. que o fenômeno supracitado deve-se ao defeito conhecido como “solda fria”, onde não ocorre a fusão do aço na região da lente de solda de forma homogênea.

Nas amostras soldadas com conjuntos de: 2300*N*, 13*cy* e 48% e 2300*N*, 13*cy* e 49% foi verificado pela técnica de microscopia ótica, que não houve a fusão do aço na região da lente, conforme apresentado nas figuras IV.25 e IV.26, respectivamente.

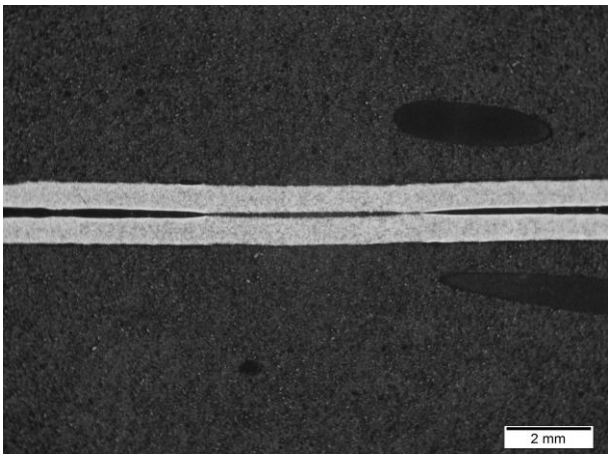


Figura IV.25 – Secção transversal do ponto de solda com os parâmetros: 2300*N*, 13 *cy* e 48%. Aumento 12,5x. NITAL 10%.

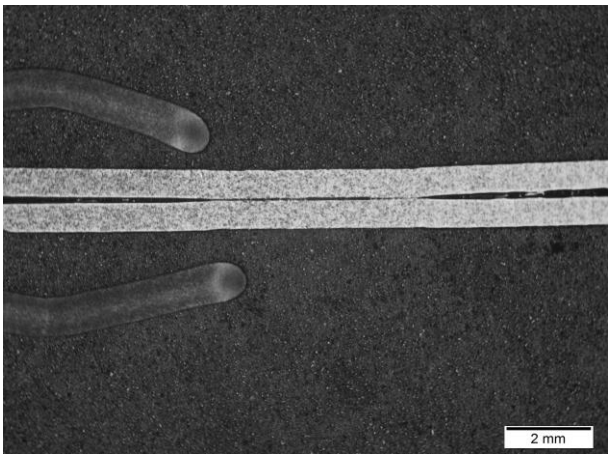


Figura IV.26 – Secção transversal do ponto de solda com os parâmetros: 2300*N*, 13 *cy* e 49%. Aumento 12,5x. Ataque químico: NITAL 10%.

Segundo STOCCO (2010), a má formação da lente de solda deve-se ao fato de aquecimento insuficiente da região. Portanto, esse tipo de defeito origina-se de um fenômeno conhecido como: Solda fria. Nesse caso, existe o início da fusão do aço somente em uma parte da região central do ponto de solda.

Nas figuras IV.27, IV.28 e IV.29 estão apresentados os resultados da medição do tamanho da lente de solda, realizados através do software OLYMPUS STREAM ESSENTIALS, pela da técnica de microscopia ótica (MO), nas secções dos pontos de solda, com os seguintes conjuntos de parâmetros: 2300*N*, 13cy e 53%; 2300*N,* 13*cy*, 52%; 2300*N*, 13*cy,* 51%, respectivamente.

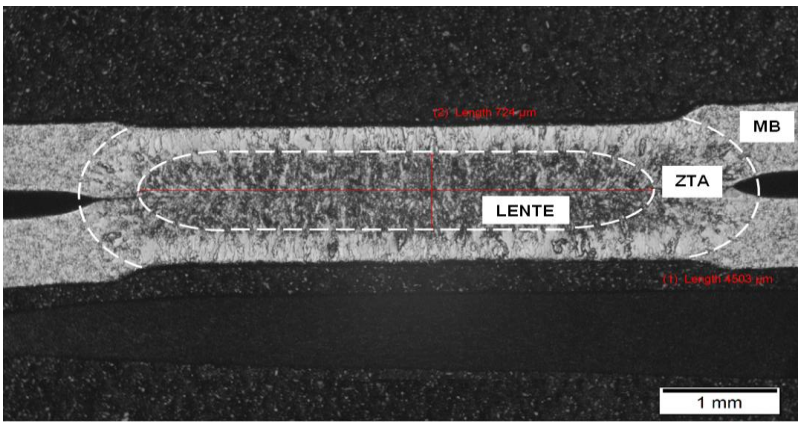


Figura IV.27 – Secção transversal do ponto de solda com os parâmetros: 2300*N,* 13 *cy* e 53%.

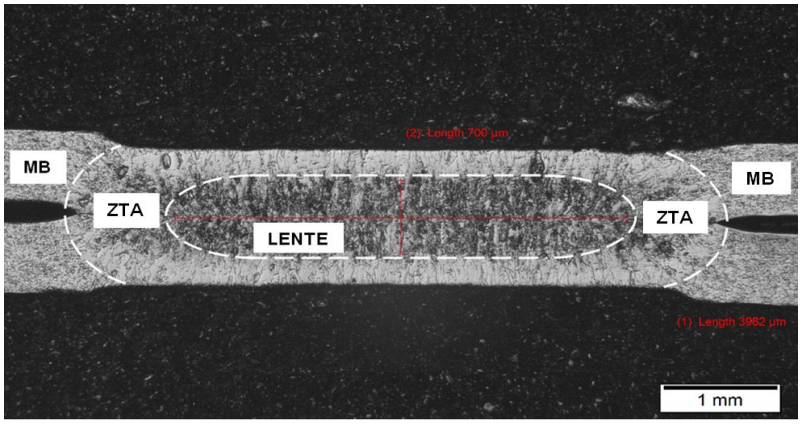


Figura IV.28 – Secção transversal do ponto de solda com os parâmetros: 2300*N*, 13 *cy* e 52%.

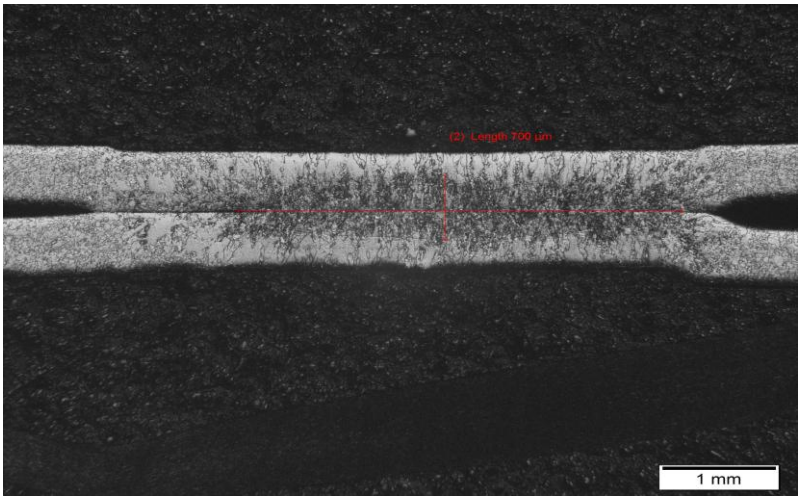


Figura IV.29 – Secção transversal do ponto de solda com os parâmetros: 2300*N,* 13 *cy* e 51%.

Na tabela IV.4 são apresentados os valores da medição do tamanho da lente de solda, nas secções dos pontos de solda, com os seguintes conjuntos de parâmetros: 2300*N*, 13cy e 53%; 2300*N,* 13*cy*, 52%; 2300*N*, 13*cy,* 51%, realizados através da ferramenta de medição do software OLYMPUS STREAM ESSENTIALS.

Tabela IV.4: Dimensões das lentes de solda para os parâmetros: 51%, 52% e 53%.

Parâmetro	**Comprimento**	**Largura**
51%	3,328*mm*	0,642*mm*
52%	3,982*mm*	0,700*mm*
53%	4,503*mm*	0,724*mm*

A partir da avaliação das micrografias foi possível verificar que: A região do metal base (MB) é composta basicamente de ferrita, a zona termicamente afetada (ZTA) é caracterizada por uma região de crescimento de grãos e.a lente de solda é formada por região martensítica.

As características microestrurais das juntas soldadas obtidas neste trabalho são similares aos encontrados por DIAS (2011), para chapas galvanizadas, de aço baixo carbono IF, com 0,75*mm* de espessura.

Nas figuras IV.30, IV.31 e IV.32 são observadas as microestruturas da região de Metal Base, ZTA e Lente, da seção transversal do ponto de solda de uma junta soldada com a melhor combinação de parâmetros: 2300*N*, 13*cy,* 52%, que atende as recomendações dos valores máximos e mínimos do comprimento do ponto de solda, seguindo critérios ótimos das curvas de soldabilidade, recomendados pela a norma ANSI/AWS/SAE D8.9-97.

Nota-se nas microestruturas do ponto de solda com parâmetro de potência da máquina de solda de 52%, conforme figura IV.32, que a lente de solda (*Welding Nugget*) é formada por uma região martensítica.

A região superior e inferior de interface entre a zona termicamente afetada (ZTA) é caracterizada por uma região de crescimento de grãos e por fim, a região de metal base (MB) é composta basicamente de ferrita.

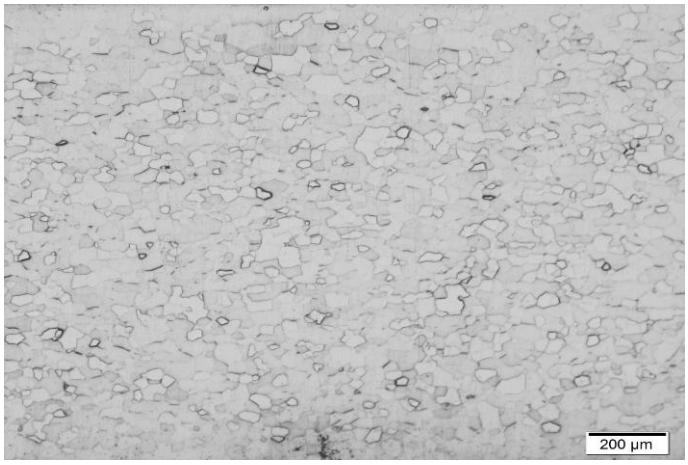


Figura IV.30 – Detalhe da microestrutura na região de MB com parâmetros de 13*cy* e 52%. Aumento de 100x. Ataque: NITAL 10%.

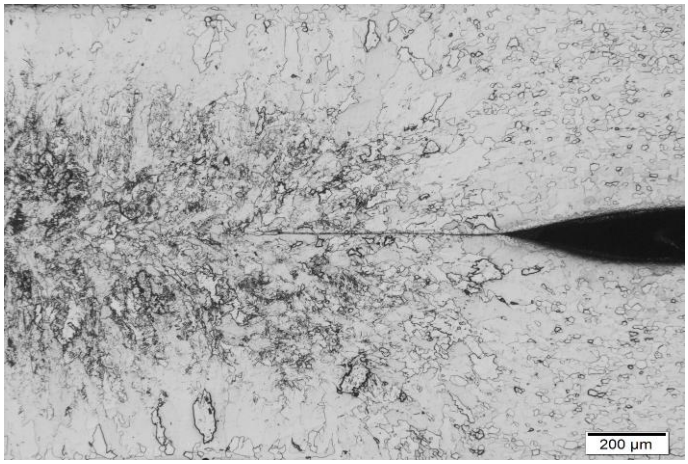


Figura IV.31 – Região superior e inferior de interface entre ZTA e a lente de solda, e à direita região de Metal Base, com os parâmetros 13*cy* e 52%. Aumento de 100x. Ataque: NITAL 10%.

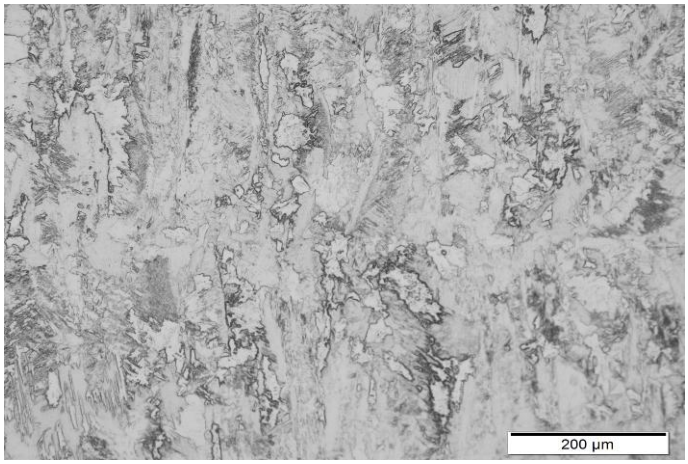


Figura IV.32 – Detalhe da microestrutura na lente de solda com parâmetros 13*cy* e 52%. Aumento de 200x. Ataque: NITAL 10%.

IV.2.2. Microscopia eletrônica de varredura

A técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) foi utilizada para avaliar alguns aspectos de difícil visualização por Microscopia Ótica (MO) e para a avaliação da redução da camada superficial das chapas de aço IF galvanizadas.

Para cada condição avaliada por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) foram obtidas análises por espectrometria de energia dispersiva (EDS), pelo processo de microanálise química semi quantitativa, por níveis de energia dispersiva de raios X, para estimar o valor de ordem de grandeza da quantidade de alguns dos principais elementos de liga presentes em cada região pontual.

A seguir estão apresentadas micrografias, realizadas através da técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), para avaliar a redução da espessura da camada de Zinco nas principais regiões do ponto de solda, nos seguintes conjuntos de parâmetros de solda: 2300*N*, 13*cy*, 51%; 2300*N*, 13*cy*, 52%; 2300*N*, 13*cy*, 53%.

A figura IV.33 apresenta a dimensão da camada superficial da junta soldada, nas proximidades do Metal Base, com uma espessura de 10,50 *µm*, utilizando o conjunto de parâmetros: 2300*N*, 13*cy* e 51%.

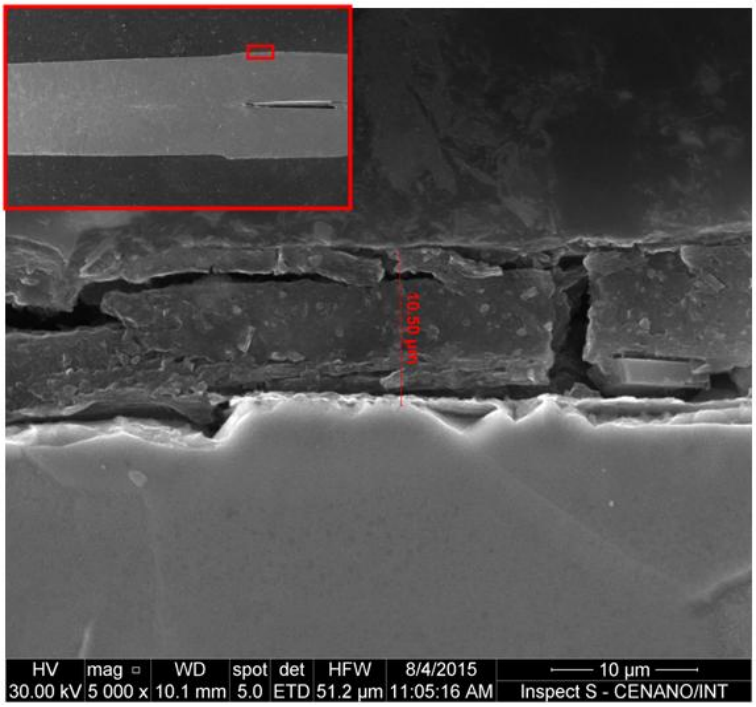


Figura IV.33 – Dimensão da camada superficial da junta soldada, na região do Metal Base, utilizando os parâmetros de solda: 2300*N*, 13*cy* e 51%. Aumento de 5000x. Ataque Nital 10%.

Nota-se nesta região a presença do elemento química Zinco (Zn), na ordem de 9,45% de massa atômica e o aumento da presença do elemento químico Silício (Si), ao realizar a verificação do espectro de EDS nos elementos de liga da camada superficial da junta soldada com a combinação de parâmetros 2300*N*, 13*cy* e 51%, conforme mostrado na figura IV.34.

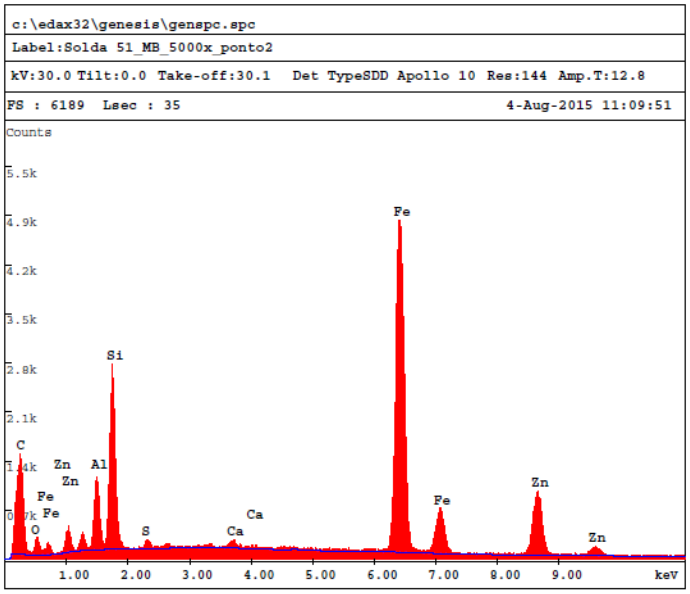


Figura IV.34 – Espectro de EDS dos elementos de liga da camada superficial da junta soldada, com parâmetros 13cy e 51%, nas proximidades da região de Metal Base.

A figura IV.35 mostra a dimensão, com aumento de 5000x, da camada superficial por uma extensão da junta soldada, na região da ZTA, próximo ao centro do ponto de solda, com espessura de 4,90 *μm*, utilizando o mesmo conjunto de parâmetros de soldagem de: 13*cy,* 2300*N* e 51% da potência elétrica da máquina estacionária de solda a ponto por resistência.

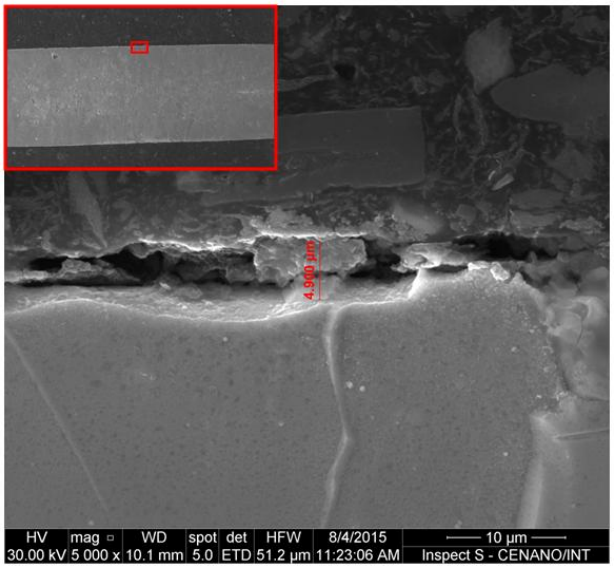


Figura IV.35 – Dimensão da camada superficial da junta soldada, na ZTA próxima ao centro do ponto de solda, utilizando os parâmetros: 2300*N*, 13*cy* e 51%, 5000x. Ataque Nital 10%.

A partir das análises por espectrometria de energia dispersiva (EDS) dos elementos de liga foi verificado o aparecimento de Enxofre (S) e uma redução significativa da presença do elemento químico Silício (Si). Além do surgimento de significativo de Cobre (Cu), devido a reação com o eletrodo nesta região avaliada.

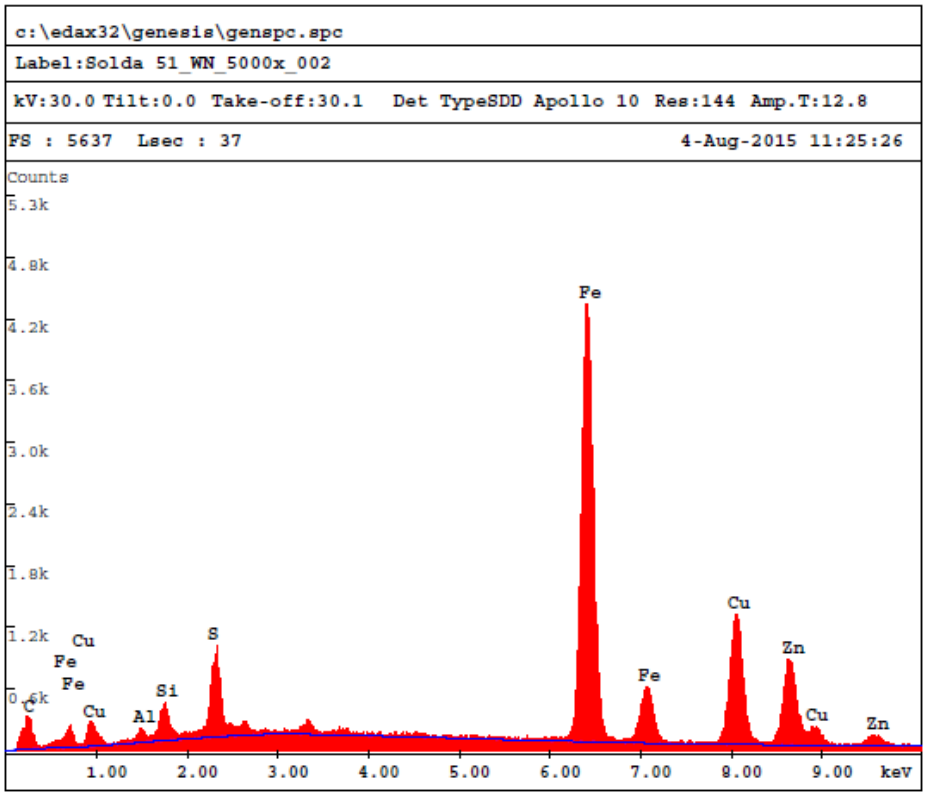


Figura IV.36 – Espectro de EDS dos elementos de liga da camada superficial da junta soldada, da região da ZTA próxima ao centro da lente de solda com parâmetros 13*cy* e 51%.

Conforme mostrado nas Figuras IV 52 e IV 54, ao observar uma extensão da camada superficial da junta soldada próxima ao centro do ponto de solda foi verificado a redução da espessura do revestimento de 2,143x (vezes), em relação a extensão dessa camada de proteção da chapa de aço IF, na região de metal base (MB) próxima a zona termicamente afetada (ZTA).

A figura IV.37 apresenta a dimensão da camada superficial, com uma espessura de 15,50*μm*, nas proximidades da região de metal base, na junta soldada com conjunto de parâmetros de: 13*cy*, 2300*N* e 52%.

Nota-se que nessa região de metal base, a camada superficial se manteve praticamente homogênea, mesmo após a união das chapas de aço IF através do processo de soldagem a ponto por resistência elétrica.

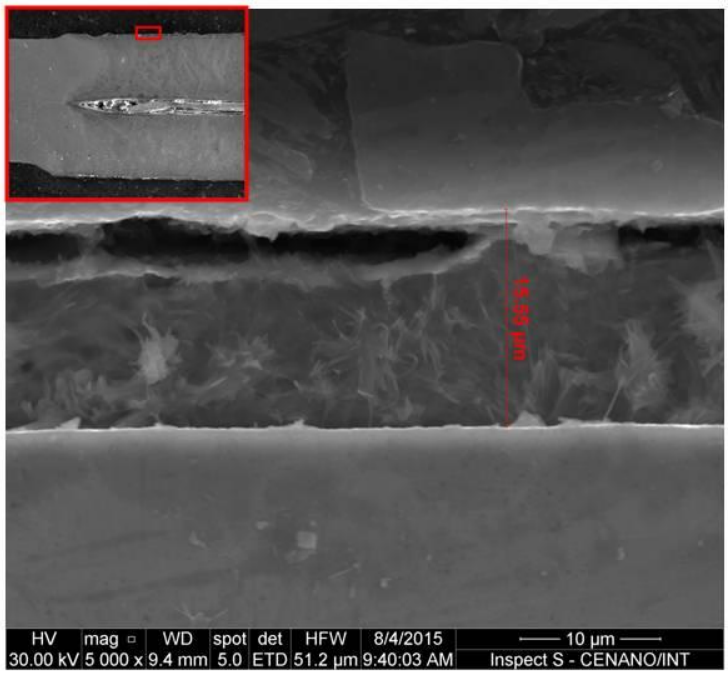


Figura IV.37 – Dimensão da camada superficial da junta soldada, na região do Metal Base, utilizando os parâmetros de solda: 2300*N*, 13*cy* e 52%. Aumento de 5000x. Ataque Nital 10%.

Na figura IV.38 estão apresentados os 3 pontos para a verificação do quantitativo dos principais elementos de liga, através da técnica por espectrometria de energia dispersiva (EDS), presentes nas proximidades da região de Metal Base (MB), em juntas soldadas de aço IF com parâmetros de: 13cy, 2300*N* e 52%, a fim de verificar alterações na morfologia da superfície da chapa metálica galvanizada.

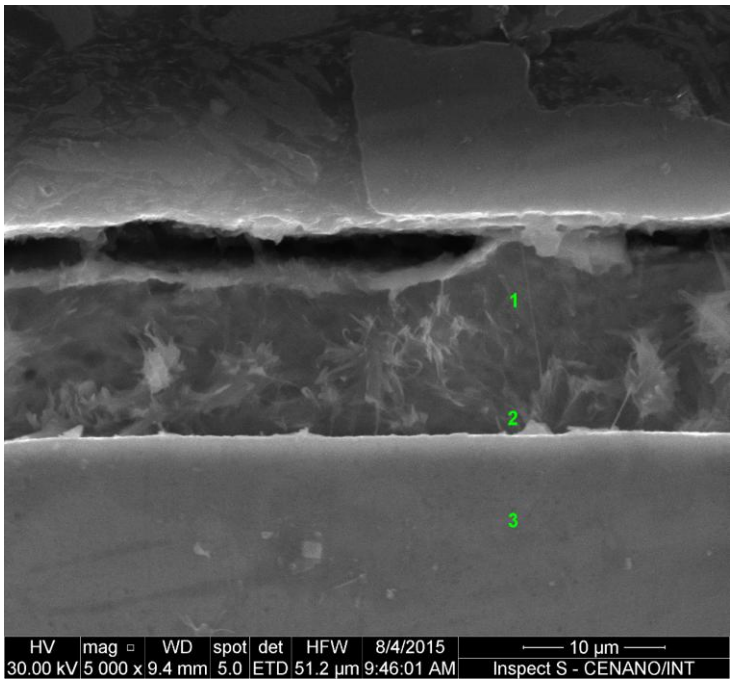


Figura IV.38 – Apresentação dos pontos para a verificação do quantitativo dos principais elementos de liga, através da técnica por espectrometria de energia dispersiva (EDS).

A partir das análises por espectrometria de energia dispersiva (EDS) realizadas nessa amostra foi verificado a redução gradual do elemento químico Zinco (Zn) e o aumento significativo do elemento químico Ferro (Fe), no sentido da superfície para o centro da região de metal base (1→3), conforme mostrado nos gráficos das figuras IV.58, IV.59 e IV.60.

Nota-se neste caso, conforme evidenciado na figura IV.57, que nessa área (1→2), localizada na região metal base, a camada superficial de revestimento de Zinco (Zn) se mantém homogênea por toda a extensão.

A partir das análises por espectrometria de energia dispersiva (EDS) dos elementos de liga nesta região da superfície do metal base (1) foi verificado o aparecimento do elemento químico Titânio (Ti) proveniente do processo de estabilização do aço IF.

Na figura IV.39 foi verificado um aumento da presença do elemento químico Ferro (Fe) e o aumento significativo da presença do elemento químico Zinco (Zn), em relação a mesma região avaliada para a combinação de parâmetros de solda: 13cy, 2300*N* e 51%.

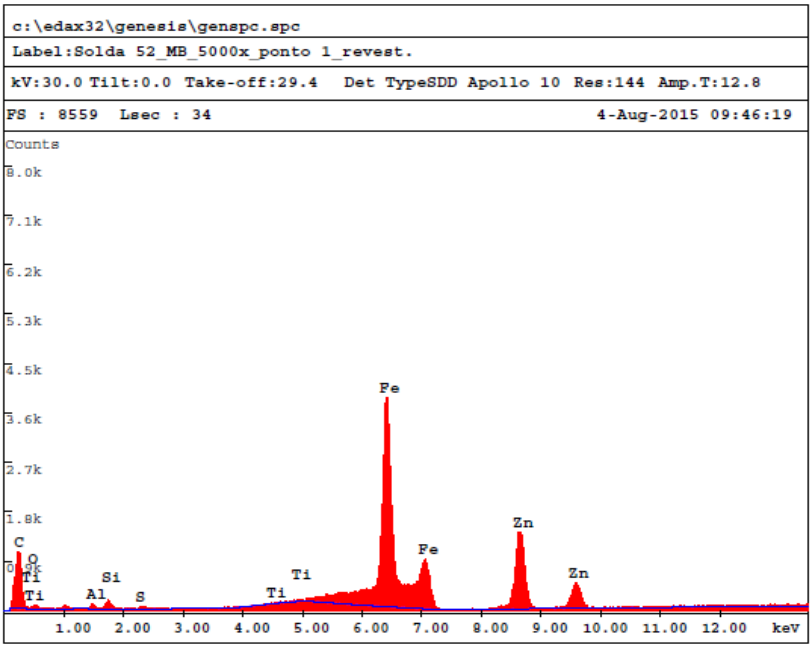


Figura IV.39 – Espectro de EDS dos elementos de liga da camada superficial da junta soldada, com parâmetros 13*cy,* 2300*N* e 52%, na região da superfície do Metal Base (1).

Na região (2), na área de interface entre a camada de superfície e o metal base, através da análise quantitativa de elementos químicos, pela técnica de espectrometria de energia dispersiva (EDS) foi verificado a redução do elemento químico Zinco e o aumento significativo da presença do elemento químico Ferro (Fe), em relação a região da superfície da camada superficial da região de Metal Base (1), conforme mostrado no gráficos da figura IV.40.

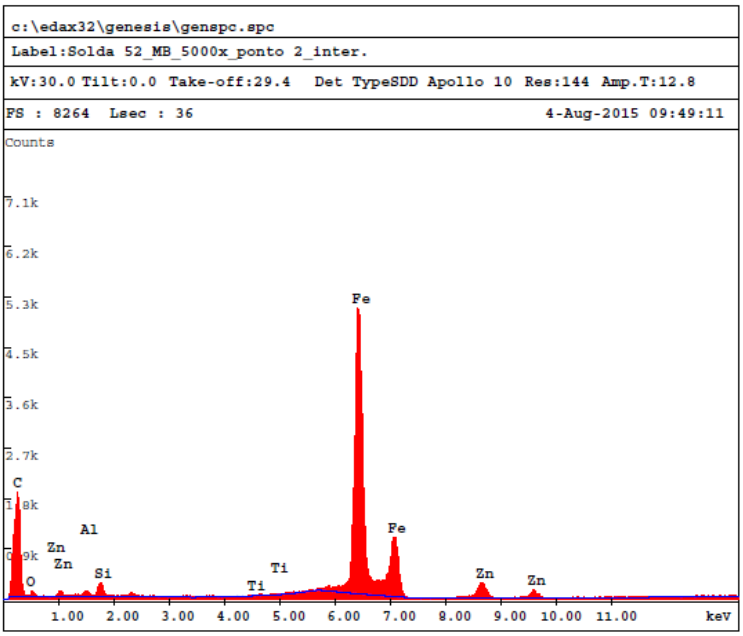


Figura IV.40 – Espectro de EDS dos elementos de liga da junta soldada, com parâmetros 13*cy,* 2300*N* e 52%, na região de interface entre a camada de superfície e o Metal Base (2).

Nota-se que a partir da técnica de espectrometria de energia dispersiva (EDS), para determinação do quantitativo de elementos de ligas, conforme apresentado na figura IV.41 aumento significativo na presença do elemento químico Ferro (Fe), em relação as demais regiões (1 e 2) da camada superficial da região de Metal Base. Portanto, nessa região de metal base (3) não há presença de outros elementos químicos encontrados normalmente na camada superficial deste aço livre de intersticiais utilizado.

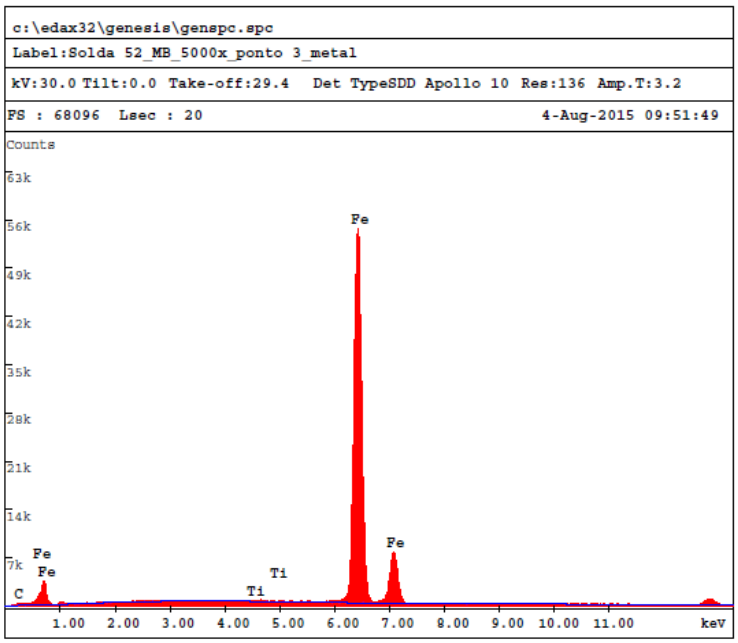


Figura IV.41 – Espectro de EDS dos elementos de liga da junta soldada, na região interna do Metal Base (3), empregando o conjunto de parâmetros de: 13*cy,* 2300*N* e 52%.

A figura IV.42 mostra a dimensão da camada superficial do aço IF, na junta soldada, com aumento de 5000x, para a região da Zona Termicamente Afetada, próximo ao centro do ponto de solda, com espessura de 3,950 *μm*, utilizando o mesmo conjunto de parâmetros de soldagem de: 13*cy,* 2300*N* e 52%.

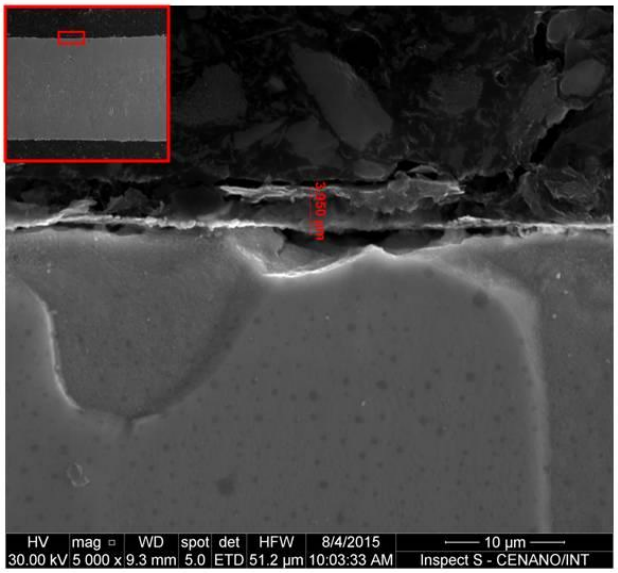


Figura IV.42 – Dimensão da camada superficial, na região da ZTA na junta soldada, utilizando o conjunto de parâmetros: 13*cy* e 52%. Aumento de 5000x e ataque NITAL 10%.

Ao observar a camada superficial da junta soldada, próxima ao centro do ponto de solda foi verificado a redução da espessura do revestimento de 3,936x (vezes), em relação a espessura na região de metal base para o ponto de solda com parâmetros: 2300*N*, 13*cy*, 52% de potência elétrica da máquina de solda.

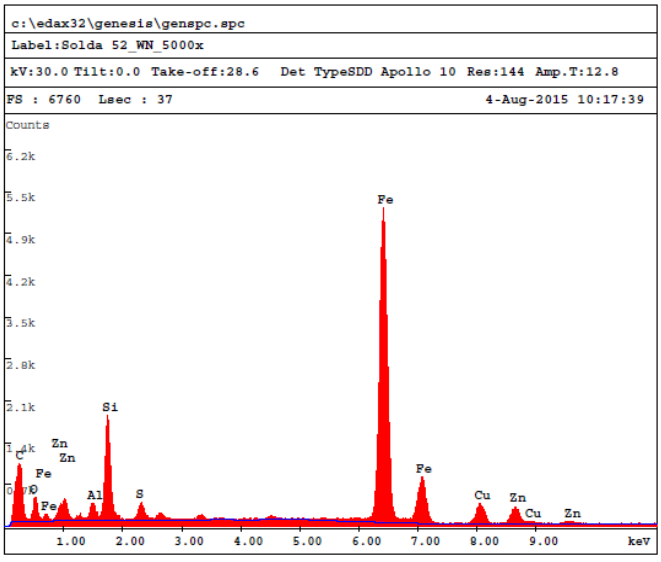


Figura IV.43 – Espectro de EDS dos elementos de liga da camada superficial da junta soldada, da região da ZTA próxima ao centro da lente de solda com parâmetros 13*cy*, 2300*N* e 52%.

Na região avaliada da ZTA próxima ao centro da lente de solda foi verificado percentual significativo de massa do elemento químico Silício (Si), além do surgimento de percentual significativo de Cobre (Cu), proveniente da reação com o material das capas de eletrodos e do aparecimento de Enxofre (S), conforme mostrado na figura IV.62 nas análises realizadas por espectrometria de energia dispersiva (EDS).

Na micrografia a seguir, realizada pela técnica de Microscopia por Varredura Eletrônica (MEV), para a região do centro da lente de solda da amostra da junta soldada com os parâmetros: 2300*N*, 13*cy*, 52% foi verificado em sua morfologia o aparecimento de uma estrutura martensítica na zona de fusão, conforme mostrado na figura IV.44.

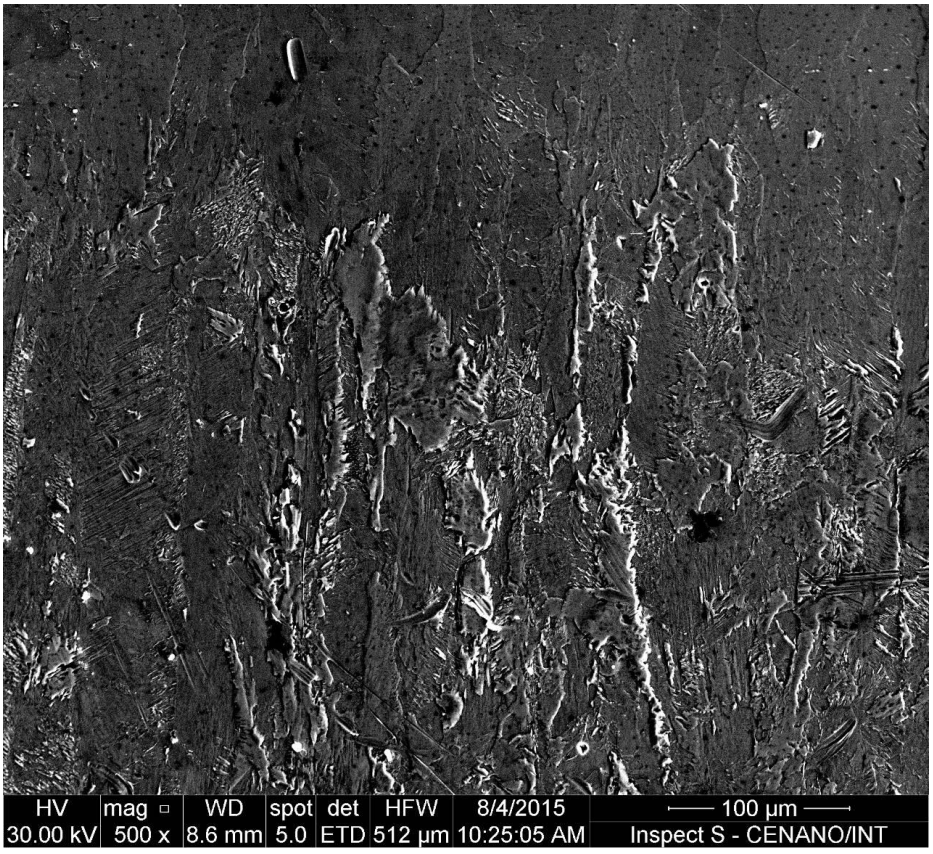


Figura IV.44 – Microscopia do centro do ponto de solda (zona de fusão), utilizando o conjunto de parâmetros de solda: 2300*N*, 13*cy* e 52%, com aumento de 5000x. Ataque Nital 10%.

Nota-se que a partir das análises por espectrometria de energia dispersiva (EDS) para determinação do quantitativo de elementos de ligas, conforme apresentado na figura IV.45, foi verificado um elevado percentual de massa de Ferro (94,03%), em relação as demais regiões da camada superficial, além da presença de Carbono (C) na região da zona de fusão. Portanto, nessa região de não há presença de outros elementos químicos encontrados normalmente na camada superficial deste aço livre de intersticiais.

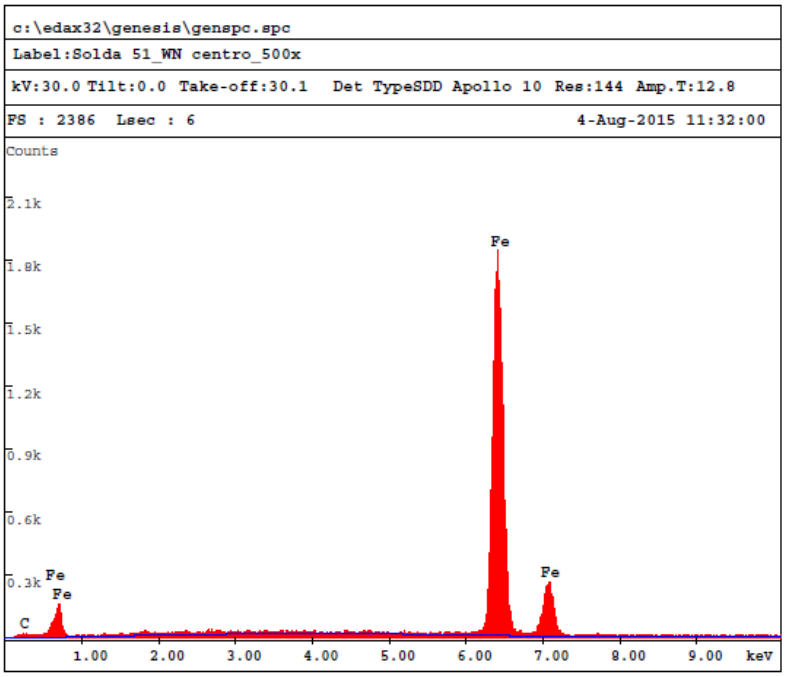


Figura IV.45 – Espectro de EDS dos elementos de liga do centro do ponto de solda, utilizando o conjunto de parâmetros: 2300*N* 13*cy* e 52%.

A figura IV.46 mostra a dimensão da camada superficial da junta soldada, com aumento de 5000x, na região da ZTA, próximo ao centro do ponto de solda, com espessura de 3,450 *µm*, utilizando o mesmo conjunto de parâmetros de soldagem de: 13*cy,* 2300*N* e 53%.

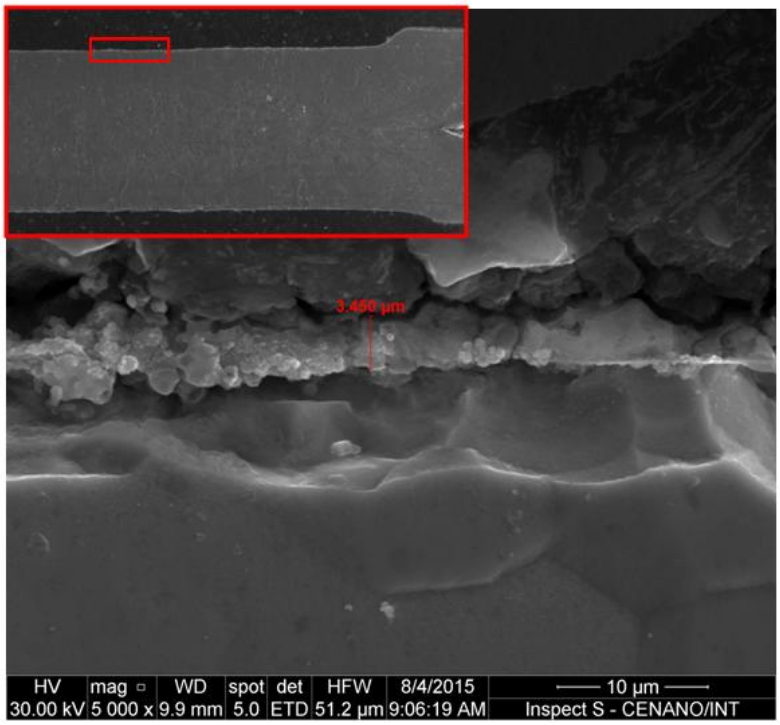


Figura IV.46 – Dimensão da camada superficial da junta soldada, na ZTA próxima ao centro do ponto de solda, utilizando o conjunto de parâmetros 13*cy* e 53%, com aumento de 5000x.

A partir das análises por espectrometria de energia dispersiva (EDS) dos elementos de liga foi verificado o aumento significativo da presença do elemento químico Silício (Si), além do surgimento de percentual significativo de Cobre (Cu) e do aparecimento de Enxofre (S),conforme evidenciado nos resultados da quantificação de elementos de liga da camada superficial da junta soldada, da região da ZTA próxima ao centro da lente de solda com parâmetros, apresentados na figura IV.47.

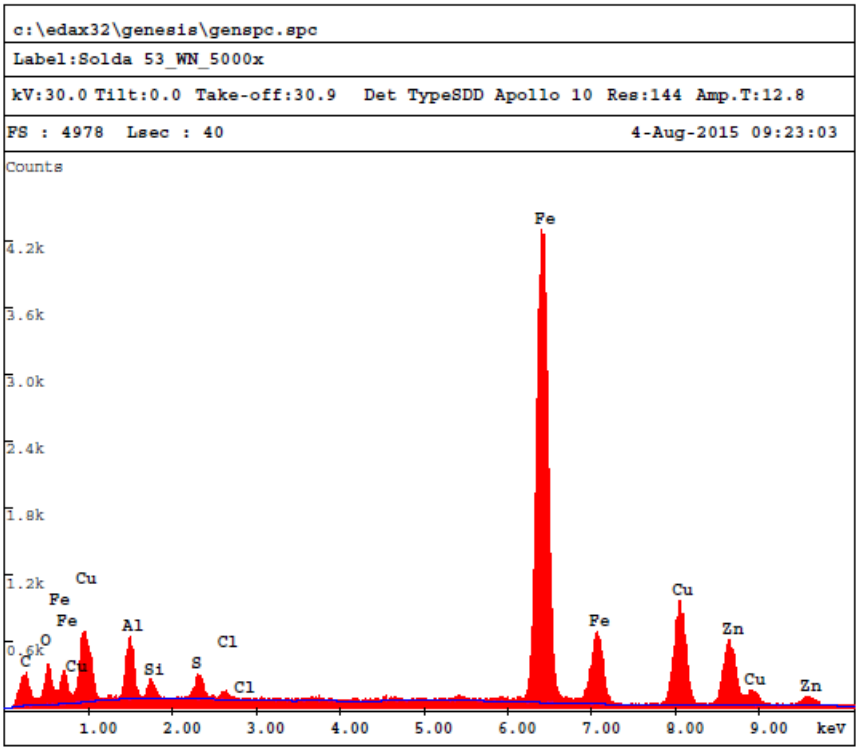


Figura IV.47 – Espectro de EDS dos elementos de liga da camada superficial da junta soldada, da região da ZTA próxima ao centro da lente de solda com parâmetros: 2300*N*; 13cy e 53%.

A partir da análise dos resultados encontrados neste trabalho conclui-se que a soldabilidade do aço IF está diretamente relacionada a resistência mecânica do ponto de solda, avaliada através do ensaio de cisalhamento; a microestrutura, avaliada pelo de ensaio metalográfico, através da técnica de microscopia ótica (MO); e pela composição química, avaliada pela técnica de EDS, no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV).

Após a verificação dos resultados dos ensaios mecânicos de cisalhamento e arracamento e das análises das micrografias pela técnica de (MO) e por (MEV) é possível confirmar a boa soldabilidade do aço IF, para a união de duas chapas com espessura de 0,75*mm*, através do processo de soldagem a ponto por resistência com os parâmetros de: 13*cy*, 2300*N* e 52% de potência elétrica da máquina estacionária, devido aos baixos teores do elemento químico carbono e uma espessura mínima da camada superficial de revestimento de Zinco, assim garantindo a qualidade do ponto de solda e a boa proteção contra corrosão.

DIAS (2011) no artigo publicado verificou que a condição ótima segundo metodologia própria para a realização de pontos de solda em aços de chapas galvanizadas de aço IF com espessura de 0,75*mm* empregando os seguintes parâmetros de solda: Tempo de solda: 9*cy*; Corrente de soldagem: 7,79*kA* (52%); Força dos eletrodos: 1962*N*. Assim, a espessura da camada de revestimento de 19,9*μm*, na região de metal base para 3,7*μm* na região próxima a lente de solda, portanto foi verificação uma redução de 5,378 vezes.

NASCIMENTO (2008) verificou a formação de lente de solda nas amostras soldadas, quando adotou os seguintes parâmetros de soldagem a ponto: Força de 1403*N*, Corrente de soldagem de 5*kA*, tempo de soldagem de 25*cy*. Assim, a partir das condições descritas foi verificado após a passagem de corrente elétrica, em uma amostra com 0,70*mm* de espessura, que a camada de Zinco (Zn) inicial de 19*μm* diminuiu para uma faixa de 8 a 10*μm* na região central do ponto de solda, quando soldada com esses parâmetros supracitados. Para a amostra com as chapas de 2,0 e 2,5*mm,* quando soldada com esses parâmetros adotados, foi verificado que a redução da espessura da camada da região do centro do ponto de solda de 12*μm para a faixa de* 1 a 3*μm*.

No trabalho supracitado, o autor utilizou chapas de aço baixo carbono, com revestimento de Zinco por galvanização a quente com 59 g/m³ e a caracterização das mesmas foi realizada pela medição da camada de revestimento em cerca de 15 pontos pela chapa soldada, em ambos os lados, encontrando-se para a chapa de 0,7*mm* um valor médio de 20±1*μm*, com desvio padrão de 0,5±1 e para as chapas de 2,0*mm* e 2,5*mm* um valor médio de 12±1*μm* com desvio padrão de 0,6±1 (NASCIMENTO, 2008).

Neste trabalho de dissertação foi verificada uma redução da espessura da camada de revestimento menor em relação ao valor encontrado por DIAS (2011). Nas proximidades da região de metal base, na junta soldada a melhor combinação os parâmetros de: 13*cy*, 2300*N* e 52%, a dimensão da camada superficial apresentou a espessura de 15,55*μm*.

Por outro lado, na região da superfície do ponto de solda, próximo a lente de solda, foi verificada que a espessura da camada de revestimento foi para 3,950*μm*, ou seja, apresentou uma redução de 3,936 vezes.

Por fim, após a avaliação do desgaste da camada de revestimento, da junta soldada, através do processo de soldagem a ponto por resistência a redução verificada foi esperada para as condições de contorno utilizadas neste trabalho, assim é possível afirmar que mesmo após a redução da camada de zinco, a junta soldada continua protegida contra a exposição de agentes químicos em um meio corrosivo.

Capítulo V – Conclusões

A partir da metodologia proposta neste estudo, para avaliação dos conjuntos de parâmetros de soldagem em metálicas sobrepostas de aço IF (*Interstitial Free Steel*) é possível concluir acerca dos seguintes aspectos:

- A partir da avaliação dos resultados dos ensaios mecânicos de cisalhamento e arrancamento, permitiu selecionar a melhor combinação dos parâmetros de soldagem: 2300*N* de força entre os eletrodos, 13*cy* de tempo de soldagem e corrente de soldagem de 8,08*kA*, que é equivalente a 52% da potência da máquina de solda, para chapas de aço IF (*Interstitial Free Steel*), com 0,75mm de espessura.

- Verificou-se através dos ensaios de microdureza Vickers que a seleção da melhor combinação de parâmetros de soldagem promoveu um aumento significativo nos valores de dureza na região da central da lente de solda, na ordem de 211,70 HV, em relação aos valores encontrados na região de metal base das chapas de aço IF.

- Através das técnicas de microscopia óptica (MO) e microscopia eletrônica de varredura (MEV) é possível verificar a predominância de ferrita nas estruturas da lente de solda, nas micrográficas avaliadas. Ao realizar a medição da espessura da camada de revestimento, a fim de verificar seu desgaste na região da lente de solda, foi evidenciado uma redução de aproximadamente 4 vezes, em relação a espessura na região de metal base, na amostra com a melhor combinação dos parâmetros de soldagem: 2300*N, 13cy e* 8,08*kA.*

- A partir das análises por espectrometria de energia dispersiva (EDS) foi verificado o surgimento significativo de Cobre (Cu), conforme evidenciado nos resultados da quantificação de elementos de liga da camada superficial da junta soldada, da região próxima ao centro da lente de solda dos principais parâmetros avaliados, devido a reação química com a capa dos eletrodos.

Capítulo VI – Sugestões para trabalhos futuros

A partir da clareza dos resultados, obtidos através deste estudo de avaliação dos parâmetros de soldagem a ponto por resistência, este tem como principal objetivo contribuir para que demais pesquisadores possam conhecer com maior profundidade as pesquisas e o desenvolvimento de conjuntos de parâmetros para esse processo de soldagem, aplicados principalmente na indústria automotiva.

Em suma, pode-se sugerir a pesquisa de alguns assuntos complementares que surgiram no decorrer deste trabalho, por não ser o objetivo principal, recomenda-se para futuros trabalhos:

- Avaliação dos parâmetros de soldagem apresentados neste trabalho para a união de duas ou mais chapas de aço IF, similares, com espessuras distintas.
- Avaliação dos melhores conjuntos de parâmetros apresentados neste trabalho, para a união de chapas de aço IF, com espessuras similares, unidas juntamente com o processo de colagem industrial.
- Avaliação do desgaste da camada de revestimento da junta soldada através do processo de soldagem a ponto por resistência, exposta em um meio corrosivo.
- Avaliação dos conjuntos de parâmetros de soldagem apresentados neste trabalho, de acordo com a norma ISO 14373:2015.

Referências Bibliográficas

AMARAL, F. F., "**Monitoramento da Qualidade na Soldagem a Ponto por Resistência Elétrica de Chapas de Aço Galvanizadas Baseado em Análise de Experimentos".** Dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção, Universidade de Itajubá, Itajubá, Brasil, 2011.

ASLANLAR, S.; OGUR, A.; OZSARAC, U.; ILHAN, E.; DEMIR, Z., "Effect of welding current on mechanical properties of galvanized chromided steel sheets in electrical resistance spot welding", Materials and Design 28 (2007) 2–7, 2005.

AURES, J. E. V., **Estudo da Formação, Geometria e Resistência do Ponto na Soldagem por Resistência: Uma Abordagem Estatística**, Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, 2006.

AWS D8.7-88, "Recommended Practices for Automotive Weld Quality - Resistance Spot Welding", 1988.

AWS D8.9-97, "Recommended Practices for Test Methods for Evaluating the Resistance Spot Welding Behavior of Automotive Sheet Steel Materials", 1997.

BRANCO, H. L. O., "Avaliação de Capas de Eletrodos Utilizadas na Soldagem por Resistência de Chapas Galvanizadas Automotivas", Curitiba, 2004.

BARROS, M. R. A., "Estudo da automação de células de manufatura para montagens e soldagem industrial de carrocerias automotivas", Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006.

BREPOHL, Danielle C. de Campos Silva. **Caracterização das camadas formadas no processo de galvanização à quente sobre uma chapa de aço livre de intersticiais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós Graduação de Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, Curitiba, 2013.

CHAKRABORTY, G., PAL, T. K., SHOME, M., "Microstructure Development in Resistance Spot Welded Galvannealed IF Steel Sheet", *Materials Science and Technology*, v. 27, n. 1, 2011.

CHAN, K.R., **Weldability and Degradation Study of Coated Electrodes for Resistance Spot Welding**, M.Sc. Thesis, University of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada, 2005.

CHAO, Y.-J.; KHAN, J. A.; XU, L., Prediction of nugget development during resistance spot welding using coupled thermal–electrical–mechanical model, Science and Technology of Welding and Joining, Vol. 4, Nº 4, pag. 201 – 207, 1999.

CHEN, X., ARAKI, K., MIZUMO, T., "Modeling and Fuzzy Control of the Resistance Spot Welding Process", 1997.

CHO, Y., RHEE, S., “Experimental Study of Nugget Formation in Resistance Spot Welding.”, *Welding Journal*, v. 82, n. 8, pp. 195-201, 2003.

CORRÊA JÚNIOR, J. G., Efeito do processamento termomecânico na resistência à fadiga de um aço IF, Dissertação de Mestrado, REDEMAT, Minas Gerais, Brasil, 2012.

COSTA, H. R. M., AGUIAR, R. A. A., REIS, J. M. L., SOUZA, J. P. B., PACHECO, P. M. C. L., “Experimental investigation of mechanical behavior of spot welding-adhesives joints”, Composite Structures, Vol. 133, P.:847–852, 2015.

CUNHA, M. L. A., Avaliação de Desempenho de Juntas Soldadas a Laser de Aros de Rodas Automotivas, em Aço de Alta Resistência, Microligado ao Nióbio, Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2008.

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

DIAS, J. S., **Uma metodologia para otimização de parâmetros de soldagem através de solda por resistência aplicada em chapas de aço “*interstitial free*” (IF),** dissertação de mestrado, Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca – CEFET/RJ, 2011.

FIETO, B. M., **Evolução da microestrutura e das propriedades mecânicas de aços IF tratados termomecanicamente,** Projeto de graduação – UFRJ / Escola Politécnica / Curso de Engenharia de Materiais , 2013.

FUKUMOTO Manabu, UCHIHARA Masato, NISHIBATA Hitomi: Influence of welding conditions on nugget formation in single-sided resistance spot welding process, Welding in the World, Vol.53, (2009), no 5/6, 15-22.

GOODARZI, M., MARASHI, S. P. H., POURANVARI, M., “Dependence of Overload Performance on Weld Attributes for Resistance Spot Welded Galvanized Low Carbon Steel”, 2009.

HAYAT, F., DEMIR, B., ACARER, M., ASLANLAR, S., “Adhesive Weld Bonding of Interstitial Free Steel at Spot Welding for Automotive Application”, 2009.

HOOK, R. E., HECKLER, A.J., ELIAS, J.A., “Texture in Deep-Drawing Columbium (Nb)- Treated Interstitial- Free Steels, Metallurgical Transaction”, pp. 1683-1692, 1975.

INTERMACHINERY, “Manual de Soldagem por Resistência a Ponto”, 2003.

INTERMACHINERY, “Manual de Soldagem por Resistência a Ponto”, 2002. 25p.

KAVAMURA, H. A., **Aplicação de solda laser em carrocerias automotivas: estudo comparativo entre a solda laser e a solda ponto por resistência.** Trabalho de curso de Mestrado Profissionalizante em Engenharia Automotiva. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – USP, São Paulo, 2007.

KRAUSS, G., WILSHYNSKY, D.O., and MATLOCK, D.K., in International Symposium on Interstitial Free Steel Sheet: Processing, Fabrication and Properties, Ed. by L.E. Collins and D.L. Baragar, p.1, CIM, Ottawa, Canada, 1991.

LASCOSQUI, Paulo Sérgio Bringhenti; RODRIGUES, Flávio José Saraiva. Desenvolvimento de aços ultra baixo carbono estabilizados ao titânio na CST Arcelor Brasil para aplicação automobilística. Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais (62.º 2007, Vitória, ES) Anais do 62º Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais - São Paulo, 2007.

LEMOS, M. S.; SILVA, B. V.; CÂNDIDO, L. C.; GODEFROID, L. B. Resistência à fadiga de aços para uso em tanque de combustível de aplicação automotiva. Congresso anual da Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, Belo Horizonte – MG, 2005.

LIAO, X., WANG, X. GUO, Z., WANG, M., WU, Y., RONG, Y., “Microstructures in a Resistance Spot Welded High Strength Dual Phase Steel”, *Materials Characterization*, 2010.

MARQUES, R. J. A., **Avaliação da resistência a corrosão de aços IF revestidos com Zinco e ligas de Zinco-Ferro destinados a indústria automobilística**, Dissertação de Mestrado Apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

MANSUR, R.J., “Estudo da degradação dos eletrodos Cu/Zr e Cu/Cr/Zr utilizados na soldagem de aços revestidos com Zn e liga Zn-Fe.” - UFF, Volta Redonda, RJ, 1998.

MODENESI, P.J.; MARQUES P.V., “Introdução aos processos de soldagem”, Ed. UFMG, 1996.

MODENESI, P.J., MARQUES P.V. e SANTOS, D.B., “Introdução a metalurgia da soldagem”, Ed. UFMG, 2012.

METALS HANDBOOK, 9th ed., vol. 6 (Metals Park, OH: American Society for Metals, 1983).

MOORE, F. ; Carvalho, J.R.P. ; DIAS, J.S. ; COSTA, H. R. M., “Evaluation of Nugget Formation in Resistance Spot Welding Process of Galvanized Sheet.” *In: 20th International Congress of Mechanical COBEM 2009*, v.1, pp. 1-10, Gramado, RS, Brasil, 2009.

MUKHOPADHYAY, G., BHATTACHARYA, S., RAY, K. K. “Strength of spot-welded steel sheets in corrosive environment” Materials and Corrosion, Volume 61, Issue 5, p. 398–406, May 2010.

NAKANO, R.K., “Influência da Taxa de Deformação na Falha de Uniões por Solda a Ponto” - São Paulo, 2005.

NASCIMENTO, V. C., **Seleção de Parâmetros de Soldagem a Ponto por Resistência, Baseado na Medição da Resistência Elétrica entre Chapas,** Tese de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia. 2008.

PENTEADO, K. M., **Otimização da Solda de Pontos por Resistência Elétrica na liga de Alumínio 5052-H32, através de Experimentos (DOE).** Tese de Mestrado, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá. 2011.

PODRŽAJ, P.; POLAINAR, I.; DIACI, J.; KARIŽ, Z., “Overview of resistance spot welding control, Science and Technology of Welding and Joining”, Vol. 13, Nº 3, Paginas: 215 – 224, 2008.

POURANVARI, M.; ASGARI, H. R.; MOSAVIZADCH, S. M.; MARASHI, S. P. H.; GOODARZI, M., “Effect of weld nugget size on overload failure mode of resistance spot welds”, Science and Technology of Welding and Joining”, Vol. 12, Nº 3, P.:217–225, 2007.

POURANVARI, M., MARASHI, S. P. H., “Critical review of automotive steels spot welds: process, structure and properties”, Science and Technology of Welding and Joining, Vol. 18, Nº 5, P.: 361–403, 2013.

RWMA – Resistance Welder Manufactures Association. **Resistance Welding Manual**, U.S.A., 4th ED., Nov.,443 p.

RAOLISON, R .N., FUENTES, A., PUVREAU, C., ROGEON, PH., CARRÉ, P., DECHALLOTTE, F., “Modeling and numerical simulation of the resistance spot welding of zinc coated steel using rounded tip electrode analysis of required conditions”, Applied Mathematical Modeling, Vol. 38, P.:2505-2521, 2014.

ROSSI, G. P., **Estudo de Correlação do Comportamento de Pontos de Solda em Corpos de Prova pelo Método dos Elementos Finitos.** Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 2007.

RUIZ, D. C., BATALHA, G. F., “Estudo de um Critério de Modo de Falha para Solda a Ponto por Resistência”, 2006.

SANTOS, F. B., **Estudo da Eficiência do Processo de Soldagem de Pontos por Resistência Elétrica Utilizado na Indústria Automobilística**, Dissertação de M.Sc., Universidade Federal Fluminense, Niterói, RJ, Brasil, 2006.

SILVA, F. R., CAMARGO, J. R., Análise inicial da solda a ponto por resistência para caracterizar o defeito por indentamento e eletrodos desalinhados Parte 1. Congresso UNEM 2010 - Taubaté - SP. 2010. (Apresentação de Trabalho/Congresso).

SOUZA, D.B., COMITRA,T.F., "**Estudo da Eficiência do Reagrupamento de Parâmetros de Solda a Ponto por Resistência Elétrica através de Análise Macrográfica**", Projeto final, Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda, RJ, 2006.

STOCCO, D. **"Caracterização de solda por resistência a ponto através de avaliações não destrutivas"**. Dissertação de Mestrado. Escola politécnica da universidade de São Paulo, 2010.

TOLF, E., HEDEGARD, J., MELANDER, A. "Surface breaking cracks in resistance spot welds of dual phases steels with electrogalvanised and hot dip zinc coating", 2013.

VARGAS, J. E., ALFARO, S.C.A., VILARINHO, L.O. "Estudo da influência dos parâmetros na geometria e resistência mecânica do ponto de solda na soldagem a ponto por resistência utilizando planejamento robusto". 16º POSMEC. Simpósio de Pós Gradução em Engenharia Mecânica. Universidade Federaç de Uberlância. 2006

ZHAO, H., RAMA, S. C., BARBER, G. C., WANG, Z., WANG, X., "Experimental Study of Deep Drawability of Hot Rolled IF Steel", *Journal of Materials Processing Technology*, v. 128, pp. 73–79, 2002.

WILLIAMS, N. T., PARKER, J.D., "Review of Resistance Spot Welding of Steel Sheets" Part 1, 2004a.

WILLIAMS, N. T., PARKER, J.D., "Review of Resistance Spot Welding of steel sheets Part 2, 2004b.

ZHOU, M., HU, S. J., ZHANG,H., "Critical Specimen Sizes for Tensile-Shear Testing of Steel Sheets", 1999.

ZHOU, M., ZHANG,H., HU, S. J., "Relationships between Quality and Attributes of Spot Welds". Welding Journal, Abril, 2003.