CEFET/RJ
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

UMA METODOLOGIA PARA OTIMIZAÇÃO DE PARÂMETROS DE SOLDAGEM ATRAVÉS DE SOLDA POR RESISTÊNCIA APLICADA EM CHAPAS DE AÇO "INTERSTITIAL FREE" (IF)

Joanes Silva Dias

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.

Orientador:
Hector Reynaldo Meneses Costa

Rio de Janeiro
Fevereiro de 2011

UMA METODOLOGIA PARA OTIMIZAÇÃO DE PARÂMETROS DE SOLDAGEM ATRAVÉS DE SOLDA POR RESISTÊNCIA APLICADA EM 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.

Joanes Silva Dias

Aprovada por:

Presidente, Profº. Hector Reynaldo Meneses Costa, D. Sc. (orientador)

Profª. Maria da Penha Cindra Fonseca (UFF), D. Sc.

Profº. Jorge Carlos Ferreira Jorge, D. Sc.

Rio de Janeiro
Fevereiro de 2011

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

D541 Dias, Joanes Silva
Uma metodologia para otimização de parâmetros de soldagem através de solda por resistência aplicada em chapas de aço “interstitial free” (IF) / Joanes Silva Dias.—2010.
xi, 97f.: il.col. , grafs. , tabs. ;enc.

Dissertação (Mestrado) Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca , 2010.
Bibliografia : f.93-97
Orientador : Hector Reynaldo Meneses Costa

1. Soldagem elétrica. 2. Aço – Soldagem. I. Costa, Hector Reynaldo Meneses (Orient.). II. Título.

CDD 671.521

" Nós topamos com uma grande variedade de fenômenos que [...] em linguagem inequívoca falam da sabedoria e da bendita mão do Grande Mestre das obras."

James Prescott Joule *(1818-1889)*

À Deus Pai criador, ao Seu Filho redentor e ao Espírito que nos santifica;

À meu pai, grande mestre da vida;

À minha amada esposa.

AGRADECIMENTOS

▪ Ao Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca (CEFET/RJ), especialmente as unidades do Maracanã e de Itaguaí por toda forma de auxílio na elaboração desta dissertação, fortalecendo o Ensino, e a Pesquisa da comunidade acadêmica;

▪ À Companhia Siderúrgica Nacional - CSN pelo apoio na utilização dos equipamentos, realização de alguns ensaios, mão-de-obra e o material gentilmente cedido para esta dissertação.

▪ Ao meu orientador, Hector Reynaldo Meneses Costa, pela amizade, ajuda, incentivo, dedicação, confiança e orientação nesta dissertação.

▪ Ao amigo Márcio L. A. Cunha da CSN pelo apoio incondicional no desenvolvimento deste estudo.

▪ Ao corpo docente do Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais (PPEMM) do CEFET/RJ, em especial aos professores Anna Carla M. Araújo, Pedro Manoel C. L. Pacheco, Luís Felipe G. Souza, Gilberto A. C. Branco, Jorge C.F. Jorge e Maurício S. Motta.

▪ À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES pelo auxílio financeiro.

▪ Ao Centro de Tecnologia SENAI-RJ Solda, pela ajuda na preparação das metalografias, em especial aos amigos Romeu Ricardo e o Sr. Elias.

▪ Aos meus amigos da Nuclebrás Equipamentos Pesados S.A. (NUCLEP) pelo apoio e realização de alguns desenhos durante a elaboração desta dissertação em especial ao J. Guerhard por seu exemplo de verdadeiro Engenheiro projetista, a todo o momento ensinando algo novo.

▪ À professora Maria da Penha Cindra Fonseca da UFF pela colaboração, sugestões finais e ótima revisão nesta dissertação.

▪ Aos meus colegas de Mestrado, Natalie Rodriguez, Vinícius R.S.S. Brito, Félix W.C. Dias, Edmilson M. Oliveira, Ignácio Drocchi, André Merelles, Alexandre, Ricardo e Maurício.

▪ Aos graduandos, Joseph Richard P. de Carvalho, Thiago Daflon e Rosemere de Araújo e principalmente aos recém-formados Guilherme Lemos Mourão e Ramon Fonseca Ferreira pelo apoio em parte dos trabalhos realizados;

▪ Ao pessoal da secretaria do mestrado em especial ao Abraão Ferreira, e Bráulio T. Santos.

▪ À minha querida esposa Geizi D. Dias, pela compreensão, apoio e paciência infinita e por sua ajuda na revisão de parte deste trabalho.

▪ Aos meus filhos João Gabriel e Lucas, que escreveram boa parte desta dissertação em meus braços, mesmo ainda não compreendendo a importância, são fontes de inesgotáveis de inspiração.

▪ Aos meus pais, Joanes O. Dias e Mª. Nupciana S. Dias pelo exemplo de vida, incentivo a todo o momento para a realização desta dissertação e por serem modelos de professores.

▪ Às minhas irmãs, Orene, Odile e Négima, pela ajuda durante a elaboração e ao cunhado Ecliton pela ajuda na entrega final desta dissertação.

▪ À Francisca e tia Uma pela ajuda ao cuidar das crianças enquanto escrevia essa dissertação.

▪ Aos meus parentes da Bahia que apesar da distância estão sempre intercedendo por minhas conquistas. Especialmente aos primos que também são meus vizinhos Edlúcio e Dhayela pelos incentivos.

▪ Aos amigos de Campo Grande onde moro que, sempre estiveram torcendo pelas minhas conquistas, Maurício Ricardo, Cláudio Barandin, Victor Hugo, Valdecyr Costa, em especial ao amigo Raphael J. C. Lima pelo exemplo de dedicação e empenho em seu Mestrado e Doutorado;

▪ Aos amigos da Igreja Católica Apostólica Romana especialmente do Ministério Universidades Renovadas (MUR) da Renovação Carismática Católica (RCC) pelas orações em prol desta conquista por meio do Grupo de Partilha dos Profissionais (GPP/RJ). Agradeço em especial ao amigo Carlos Alberto Ferreira pelo incentivo ao aperfeiçoamento na carreira de docência.

▪ Aos amigos Augusto Antunes, Thiago Melo, Sérgio Mota, Nestor Guevara, Steve Farjado, Gabriel Silva, André Avelino, Carlos Magno e Márcio Silva pelo apoio.

RESUMO

UMA METODOLOGIA PARA OTIMIZAÇÃO DE PARÂMETROS DE SOLDAGEM ATRAVÉS DE SOLDA POR RESISTÊNCIA APLICADA EM CHAPAS DE AÇO “INTERSTITIAL FREE” (IF)

Joanes Silva Dias

Orientador:
Hector Reynaldo Meneses Costa

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 propor uma otimização de parâmetros de soldagem através do processo de solda a ponto por resistência, aplicado em chapas de aço “Interstitial Free” (IF). A metodologia utilizada constou do uso de um medidor de parâmetros com a finalidade de garantir precisão dos valores. Os principais parâmetros selecionados através de levantamento da curva de soldabilidade foram a força, o tempo e a corrente de soldagem. Para avaliação da resistência da solda e do desgaste do eletrodo foram realizados ensaios mecânicos de cisalhamento, tração axial e microdureza. Avaliação microestrutural por microscopia óptica (MO) e microscopia eletrônica de varredura (MEV) foram realizadas, evidenciando as estruturas micrográficas, a redução da espessura do revestimento na região da solda e o aspecto dos microconstituintes predominantes. Através dos ensaios mecânicos de tração axial e de cisalhamento foram verificadas a utilização das capas dos eletrodos em até 1250 pontos com soldas aceitáveis. Os resultados obtidos no ensaio de microdureza indicaram aumento significativo da dureza na lente de solda elucidada pelas diferenças dos microconstituintes avaliados através de MO e MEV. A metodologia utilizada para seleção de parâmetros permitiu evidenciar uma combinação ótima com parâmetros de força dos eletrodos de 200*kgf*, tempo de soldagem de 9*cy* e corrente de soldagem de 7,8*kA*, em chapas de aço IF sobrepostas com 0,75*mm de espessura,* favorecendo assim o aumento da vida útil do eletrodo, além de garantir uma melhoria da qualidade das soldas e consequente redução do consumo de energia aplicada a este processo de soldagem.

Palavras-chave:
Soldagem por resistência; Aços “Interstitial Free” (IF); Otimização.

Rio de Janeiro
Fevereiro de 2011

ABSTRACT

A METHODOLOGY FOR OPTIMIZATION OF WELDING PARAMETERS THROUGH RESISTANCE SPOT WELDING IN INTERSTITIAL FREE STEEL PLATES.

Joanes Silva Dias

Advisor:
Hector Reynaldo Meneses Costa

Abstract of dissertation submitted to Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais – Centro Federal de Educacao Tecnologica Celso Suckow da Fonseca CEFET/RJ as partial fulfillment of the requirements for the degree of Mestre em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais.

This thesis aims to propose an optimization of welding parameters through the process of resistance spot welding, applied to Interstitial Free (IF) steel plates. The methodology consisted of using a weld tester in order to ensure the accuracy of values. The main parameters selected through a survey of the weldability lobe were: force, time and welding current. To evaluate the resistance of the weld and the electrode wear, mechanical tests were performed like tensile-shear, cross-tension and microhardness. A microstructural evaluation by optical microscopy (OM) and scanning electron microscopy (SEM) were made reducing the thickness of the coating in the weld region and macro and microstructures were observed. Through the tensile-shear and cross-tension tests were verified using electrodes caps up to 1250 points with acceptable welds. The microhardness test results indicated significant hardness increase in weld nugget elucidated by differences in microconstituents evaluated by OM and SEM. The methodology used for parameter selection has highlighted an optimal combination with 200*kgf* electrodes force, 9*cy* welding time and 7.8 *kA* welding current, in overlap IF steel sheets with 0.75*mm* of thickness, thereby increasing the lifetime of the electrode and ensures a better quality of welds and the consequent reduction of energy applied to the weld process.

Keywords:
Resistance Spot Welding (RSW); Interstitial Free (IF) steel; Optimization.

Rio de Janeiro
February, 2011

Sumário

Introdução **1**

I Revisão da Literatura **3**

I.1 Fundamentos da Soldagem a ponto por resistência 3

I.2 Eletrodos da Soldagem a ponto por resistência 6

I.2.1 Desgaste dos eletrodos da Soldagem a ponto por resistência 8

I.3 Parâmetros de Soldagem a ponto por resistência e seus efeitos 11

I.3.1 Corrente de Soldagem 11

I.3.2 Força de Eletrodo 12

I.3.3 Tempo de Soldagem 13

I.4 Aços “Interstitial Free” (IF) 15

II Metodologia experimental **19**

II.1 Material 19

II.2 Soldagem 19

II.2.1 Máquina de Solda 19

II.2.2 Eletrodos 20

II.2.3 Equipamento de Calibração 21

II.2.4 Parâmetros de Soldagem 24

II.3 Avaliação da resistência da solda e do desgaste 27

II.3.1 Ensaio de cisalhamento 28

II.3.2 Ensaio de tração axial 29

II.3.3 Ensaio de arrancamento 30

II.3.4 Ensaio de microdureza 32

II.3.5 Ensaios Metalográficos 33

III Resultados e discussão 37

III.1 Sistema de aquisição e de monitoração dos parâmetros de soldagem 37

III.2 Análise de Otimização de parâmetros de soldagem 39

III.3 Ensaios Mecânicos 50

III.3.1 Ensaio de arrancamento 50

III.3.2 Ensaio de cisalhamento 54

III.3.3 Ensaio de tração axial 58

III.3.4 Comparação entre ensaios 60

III.4 Microdureza Vickers 64

III.5 Avaliação de desgaste do revestimento 69

III.6 Microscopia eletrônica de varredura 76

III.7 Considerações finais e recomendações 88

Conclusões 91

Sugestões para trabalhos futuros 92

Referências Bibliográficas 93

Introdução

Atualmente a soldagem a ponto por resistência – também conhecida como Resistance Spot Welding (RSW) – é largamente empregada na indústria automotiva, aeroespacial e na fabricação de componentes estruturais de veículos metro-ferroviários. Embora a concepção de novas formas e processos de união tais como a soldagem a laser, por resistência indireta e a utilização de adesivos estejam sendo desenvolvidos e empregados, a soldagem a ponto por resistência ainda é predominante. Os principais atrativos para a larga utilização da soldagem por resistência são a simplicidade, a rapidez, a facilidade na operação, a ausência de aparatos complexos para execução e a facilidade com que se pode adaptar este processo em linhas de fabricação automatizada.

A utilização desse tipo de soldagem tem crescido enormemente desde a primeira chapa automotiva soldada, a qual foi introduzida em 1933. Tornou-se o processo predominante na montagem das carrocerias automotivas, com uma média inicialmente de 4500 pontos soldados em cada carro (BRANCO, 2004). Esta soldagem propicia a união coerente entre duas ou mais chapas por meio da fusão entre os metais base na região de sobreposição, transmitindo de forma segura e eficiente esforços de uma estrutura a outra.

Na fabricação de automóveis, uma parte muito interessante é a montagem das carrocerias. Partindo-se de chapas de aço (galvanizadas ou não), faz-se uma conformação mecânica das diversas partes – lateral, teto, assoalho, portas, capôs, pára-lamas, etc, seguindo-se da soldagem. O processo de soldagem mais utilizado para montar as carrocerias é o processo de soldagem a ponto por resistência, devido ao seu baixo custo, boa qualidade, aquecimento localizado resultando numa baixa distorção.

A soldagem a ponto por resistência, ou simplesmente soldagem por resistência, é considerada um tipo de soldagem muito abrangente, pois é possível a soldagem de materiais dissimilares e de espessuras diferentes. Em uma empresa automobilística este processo de soldagem em chapas com espessuras e características diferentes, como revestimento, matéria prima, propriedades mecânicas, é muito utilizado. Mas gera um problema, a grande quantidade distinta de parâmetros de soldagem. Em uma indústria onde existe uma baixa cadência de produção, uma mesma pinça de solda é direcionada para realizar vários pontos em conjuntos com parâmetros diferentes. Isto gera um custo financeiro e de qualidade ao produto, visto que existem duas maneiras de se trocar o parâmetro de solda de uma pinça, automaticamente e manualmente, onde o primeiro gera um custo financeiro, pois os trocadores de parâmetros têm um custo elevado, e o segundo gera um custo de qualidade, pois todo processo manual é seguido de um risco de falha humana (SOUZA, 2006).

Neste processo de soldagem inúmeros resultados podem ser encontrados devido a grande variedade de parâmetros presentes. Nota-se a dificuldade de se obter informações que apontem para uma combinação ótima, que varie sensivelmente com modificação nos parâmetros, pois estes são interdependentes. Sendo considerados “combinações de parâmetros ótimos” os parâmetros selecionados dentro da curva de soldabilidade que serão mais detalhados adiante.

A operação de soldagem envolve de uma maneira importante uma deformação na chapa no nível da zona de contato entre os eletrodos e as chapas. Esta deformação chamada de impressão é essencialmente ligada à energia de soldagem (intensidade, tempo de soldagem), força de soldagem, às características termomecânicas das chapas assim como à geometria da face ativa do eletrodo.

O objetivo deste trabalho foi avaliar, em chapas de aço “Interstitial Free” (IF), através de um metodologia própria a influência de alguns parâmetros de soldagem a ponto por resistência, como: a força entre os eletrodos, o tempo e a corrente de soldagem. Utilizando ensaios mecânicos de cisalhamento, tração axial e microdureza para avaliação da resistência da solda e do desgaste do eletrodo. E avaliação microestrutural por microscopia óptica (MO) e microscopia eletrônica de varredura (MEV), a fim de evidenciar as estruturas micrográficas, a redução da espessura do revestimento na região da solda e o aspecto dos microconstituintes predominantes.

Capítulo I – Revisão da Literatura

I.1. Fundamentos da Soldagem a ponto por resistência

No processo de soldagem a ponto por resistência as peças sobrepostas a serem soldadas são pressionadas uma contra a outra por meio de eletrodos movimentados por forças mecânica, pneumática, hidráulica ou uma mistura delas. Em seguida, um curto pulso de baixa tensão e alta corrente é fornecido e passa pelos eletrodos, não consumíveis, através do metal base. A resistência deste metal base à passagem da corrente ocasiona uma quantidade de calor nas superfícies de contato das peças proporcional ao tempo, resistência elétrica e intensidade de corrente a qual deverá ser suficiente para permitir que esta região atinja o ponto de fusão do material formando-se uma região fundida que recebe o nome de **lente de solda** (METALS HANDBOOK, 1983). Quando o fluxo de corrente cessa, a força dos eletrodos ainda é mantida enquanto o metal de solda rapidamente resfria e solidifica. Os eletrodos são retraídos após cada ponto de solda. A área por onde passa a corrente de soldagem, a forma e o diâmetro das lentes de solda geradas são limitados pelo diâmetro e contorno da face do eletrodo.

Cada ponto de solda é realizado em um ciclo de soldagem, como mostrado na figura I.1. Neste caso a frequência da rede é de 60 *Hz* e 1 pulso ou ciclo terá a duração de: 1/60 = 0,0167*s*. Este processo é ideal para soldar chapas finas, de até 3 *mm*. Maiores espessuras de chapas podem ser soldadas, mas máquinas especiais devem ser utilizadas. A indústria automotiva, a principal usuária deste processo, utiliza na construção dos automóveis entre 3000 e 4000 pontos de solda (AURES, 2006).

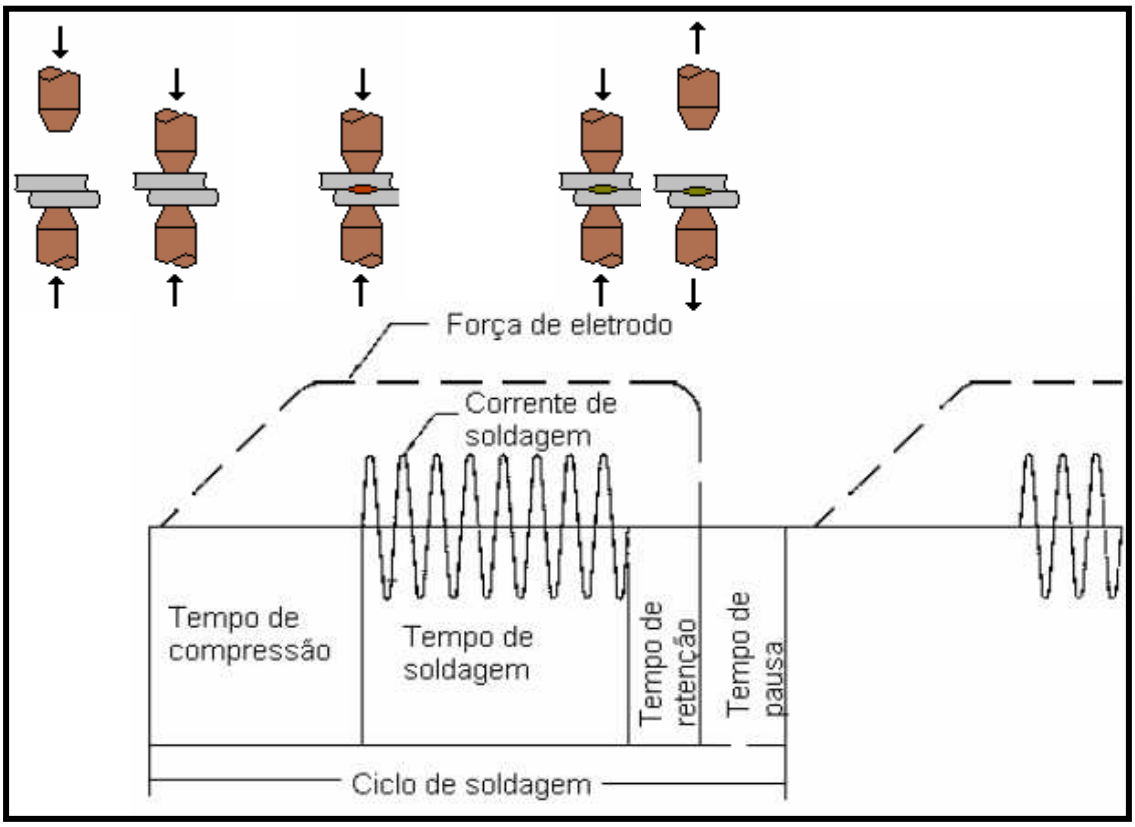


Figura I.1 – Ciclo de solda por resistência (SOUZA, 2006).

Após a conclusão do ciclo de soldagem, uma lente de solda deverá ter sido formada, como mostrado na figura I.2. A impressão é a uma impressão deixada pelos eletrodos na chapa durante o processo de soldagem, sendo desejável que ela seja a mínima possível.

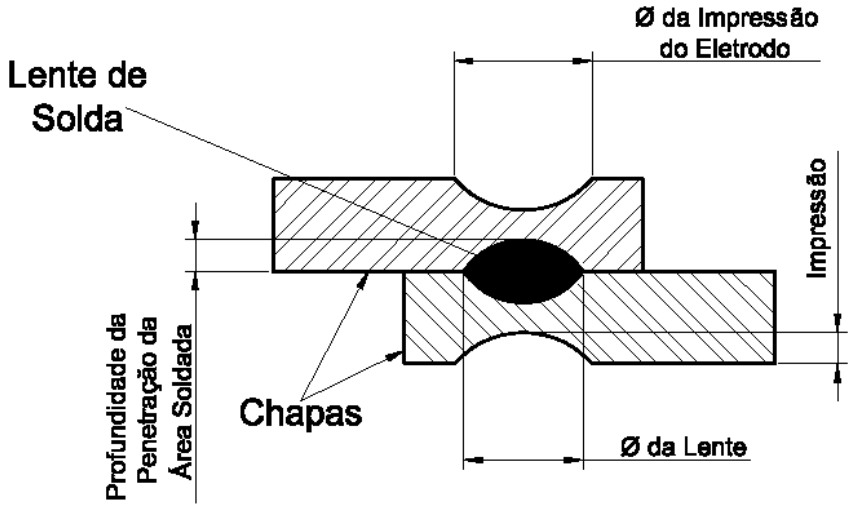


Figura I.2 – Lente de Solda (BRANCO, 2004 - modificado)

O calor requerido para o processo de soldagem por resistência é produzido pela resistência do metal base à passagem da corrente elétrica, denominado efeito Joule. Devido ao curto caminho da corrente elétrica no metal base e ao limitado tempo de soldagem, as correntes de soldagem relativamente altas são necessárias para desenvolver o calor de soldagem adequado. A geração de calor no local da solda resulta da ação combinada destes três parâmetros (BRANCO, 2004):

1 – Corrente elétrica;

2 – Resistência Ôhmica do condutor (incluindo resistência da interface);

3 – Tempo de aplicação da corrente de soldagem.

Esses três fatores afetam a geração de calor, que é expresso pela equação 1:

$$Q = I^2 \, R \, t \qquad \textbf{eq. 1}$$

Onde:
Q - Calor gerado em Joules;
I - Corrente elétrica em Ampéres;
R - Resistência em Ohms;
t - Tempo de duração da corrente em segundos.

Na soldagem por resistência então, o calor gerado é proporcional ao quadrado da corrente de soldagem e diretamente proporcional à resistência e o tempo. Parte do calor gerado é utilizada para gerar a solda e parte é perdida por condução, convecção e radiação para o metal base e eletrodo. A magnitude destas perdas é geralmente desconhecida (AURES, 2006).

A figura I.3 mostra os efeitos compostos de geração de calor e dissipação nas peças de trabalho e eletrodos. Como se pode ver há 7 resistências conectadas em série, sendo elas:

- 1 e 7: resistência elétrica do material do eletrodo;

- 2 e 6: resistência de contato entre o eletrodo e o metal base. A magnitude desta resistência depende da condição da superfície do metal base e do eletrodo, do tamanho e do perfil da face do eletrodo e da força de eletrodo. Este é um ponto de alta geração de calor, mas a superfície do metal não atinge sua temperatura de fusão durante a passagem de corrente devido à alta condutibilidade térmica dos eletrodos (1 e 7) e ao fato de que eles são usualmente refrigerados a água;

- 3 e 5: resistência total do próprio metal base, que é inversamente proporcional à área da seção transversal por onde a corrente passa;

- 4: resistência do metal base da interface no local onde a solda deve ser formada. É o ponto de mais alta resistência e, portanto, o ponto de maior geração de calor.

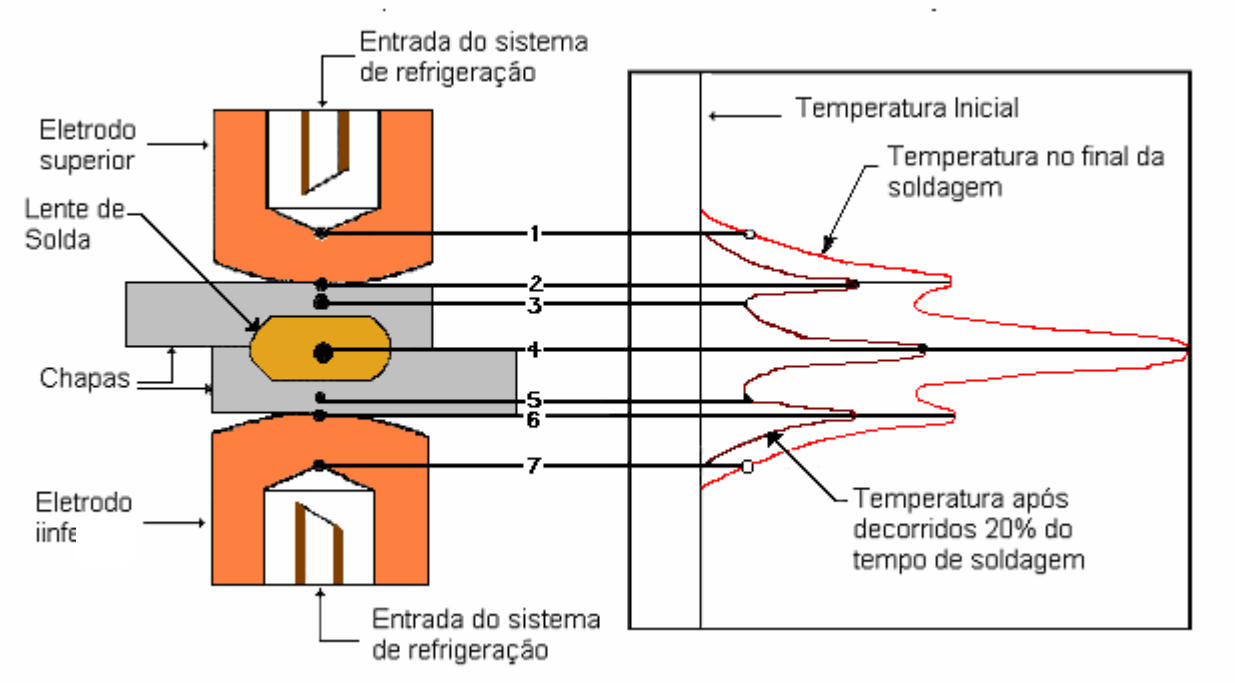


Figura I.3 – Pontos principais de calor nos eletrodos e gradiente de temperatura após 20% do tempo de soldagem e no final do processo (AURES, 2006).

I.2. Eletrodos da Soldagem a ponto por resistência

Os eletrodos são elementos condutores de eletricidade, não consumíveis, sendo fabricados de ligas de cobre. Eles desempenham um papel vital na geração de calor, porque conduzem a corrente de soldagem até o material, transferem a pressão necessária para unir as chapas e auxiliam na dissipação do calor da região de solda. No caso de solda a ponto, a área de contato do eletrodo controla amplamente o diâmetro resultante do ponto de solda e a densidade de corrente de soldagem. Os eletrodos devem ter boa condutibilidade elétrica, mas eles devem também ter resistência mecânica e dureza adequada para resistir à deformação causada por aplicações repetidas e altas solicitações térmicas (BRANCO, 2004).

Os eletrodos podem estar sob forma de capas, pontas arredondadas, discos, rolos, mas todos eles desempenham a mesma função, que é de conduzir a corrente até o metal base, aplicar a força necessária e dissipar o calor gerado durante o processo de soldagem. As capas de eletrodo são um dos componentes mais importantes nos processos de solda a ponto. A

qualidade final do ponto de solda depende muito do estado da capa de eletrodo durante o processo de soldagem. Para que esta qualidade final venha a ocorrer, os materiais das capas de eletrodos utilizadas em solda a ponto devem ter condutividade elétrica e térmica suficientemente alta e resistência de contato suficientemente baixa para prevenir o aquecimento excessivo da superfície das chapas. Diminuindo assim a velocidade de formação de liga de cobre entre o material do eletrodo com o revestimento da chapa. Devem possuir ainda, resistência mecânica suficientemente alta para resistir à deformação em elevadas pressões e temperaturas de operação, transmitir a força de soldagem às chapas, dissipar rapidamente o calor da zona de solda e não aderir à peça (BRANCO, 2004).

Os eletrodos à base de cobre estão classificados segundo a Resistance Welder Manufacturers Association (RWMA) em 3 classes (RWMA,2002):

(a) Classe 1: É composta de materiais não tratáveis termicamente e endurecidos por trabalho a frio, que não afeta as altas condutibilidades térmica e elétrica;

(b) Classe 2: É composta por materiais com propriedades mecânicas mais altas e condutibilidades elétrica e térmica mais baixas em relação aos eletrodos da Classe 1. As propriedades mecânicas e físicas requeridas são conseguidas por tratamento térmico ou por uma combinação de tratamento térmico e trabalho a frio. Os eletrodos da Classe 2 são os mais utilizados e podem se adequar a uma ampla faixa de metais e condições;

(c) Classe 3: É composta por materiais com capacidade de resistir a altas taxas de calor e pressão quando comparados com os materiais das classes 1 e 2. São fabricados utilizando cobre e material refratário.

Os eletrodos de Cu/Cr (1% Cr), Cu/Cr/Zr (1% Cr; 0,25% Zr) e CuZr (0,15% Zr) são formados por ligas endurecidas por precipitação. Estas ligas adquirem tais propriedades através da adição de elementos de liga em solução que é envelhecida em certas condições de tempo e temperatura, promovendo a formação de finos precipitados. A exposição a altas temperaturas por períodos maiores de tempo permite que os precipitados cresçam, reduzindo a resistência devido ao super envelhecimento. As temperaturas atingidas durante a soldagem por resistência são suficientes para destruir a estrutura dos precipitados. A condutibilidade elétrica destes tipos de eletrodo está na faixa de 80% a 90% IACS (International Annealing Copper Standard) (INTERMACHINERY, 2002).

Algumas ligas de cobre podem ser produzidas com cobre livre de oxigênio. Estas ligas não apresentam partículas de óxido, são produzidas sem o uso de agentes químicos desoxidantes, não apresentando em sua composição química resíduos de agentes

desoxidantes, como o fósforo. O cobre livre de oxigênio apresenta melhores condições para os trabalhos de conformação a frio que ocorre com as capas de eletrodo. O cobre sendo isento de oxigênio e, portanto, não suscetível à fragilização pelo hidrogênio, possui resistência mecânica mais elevada em relação às ligas de cobre que contém oxigênio, particularmente no que diz respeito à resistência ao recozimento. A vantagem de se utilizar as ligas de cobre livre de oxigênio é que elas apresentam uma condutibilidade elétrica maior que as outras ligas, cerca de 90 a 95% IACS (INFOMET – 1998).

Existem ainda as ligas de $CuAl_2O_3$ de “Cobre endurecido por dispersão” (DSC), um membro da família dos “Compostos Metálicos da Matriz” (MMC) que inclui outras inovações de alta tecnologia tais como Alumínio com partículas reforçadas para aplicações aeroespaciais e ferro fundido vermicular reforçado para blocos fundidos de motor (CRAGGS, 2002, INTERMACHINERY, 2002, RWMA, 2002). Ligas convencionais são combinações de elementos metálicos que interagem um com outro, por exemplo, ligas Alumínio – Zinco formarão intermetálicos de partículas de AlZn que servem para distorcer a estrutura metalúrgica e com isso fornecer a rigidez necessária. MMC’s são diferenciados das ligas convencionais já que elas são uma mistura de elementos metálicos e não metálicos, tecnicamente elas não são ligas, mas compósitos endurecido por dispersão, sendo a matriz o cobre com adições de partículas de Al_2O_3 (CRAGGS,2002, INTERMACHINERY, 2002, RWMA, 2002).

O princípio básico de produção do $CuAl_2O_3$ é a substituição dos elementos metálicos por uma cerâmica, um elemento ou um composto com excepcional estabilidade em alta temperatura. O processo de fabricação desta capa é bastante interessante, envolvendo a fusão de uma liga Cu-Al, seguida de atomização para oxidação seletiva do Al. Obtém-se um pó contendo partículas de cobre (Cu) e Al_2O_3, que é extrudado e trefilado até as dimensões finais. O tamanho das partículas de Al_2O_3 é 3 a 12*nm*, com espaçamento entre partículas de 30 a 100*nm*, o que acarreta uma densidade entre 1016 – 1017 *partículas/cm*^{3}. Com essas características de fabricação, o Al_2O_3 ancora os contornos de grão do cobre, limitando seu tamanho. A restrição de crescimento dos grãos favorece a manutenção da dureza a quente. (CRAGGS, 2002, INTERMACHINERY, 2002).

I.2.1. Desgaste dos eletrodos da Soldagem a ponto por resistência

O processo de soldagem por resistência envolve complicadas interações entre as propriedades físicas e metalúrgicas da chapa metálica, revestimento da chapa, materiais do eletrodo e os parâmetros de soldagem. Devido a essas interações, ou seja, exposição do

eletrodo a altas temperaturas, altas pressões, faz com que o eletrodo sofra alterações nas suas características originais, formando crateras na face de contato e aumento do diâmetro da face do eletrodo, perdendo sua dureza normalmene entre 50 e 100 pontos de solda. A estas mudanças nas características originais do eletrodo chama-se de desgaste do eletrodo (INTERMACHINERY, 2003, JOINING, 1997).

A quantidade de corrente a passar e o calor gerado pela corrente nas superfícies de contato das peças é função direta do diâmetro do eletrodo. Este efeito é chamado “Densidade de Corrente” que é a quantidade de corrente que pode passar por uma determinada superfície (A/mm^2). Se o diâmetro do eletrodo for pequeno a densidade de corrente será alta, maior quantidade de corrente será aplicada em uma área menor, maior calor será gerado e afundamento do eletrodo na chapa (impressão) pode acontecer de forma excessiva. Se o diâmetro do eletrodo é maior, a densidade de corrente será menor, pouco calor será gerado, a pressão do eletrodo diminuirá e a solda pode não ser realizada ou será fraca e a expulsão de metal pode acontecer.

Um problema inerente à soldagem de aços galvanizados com eletrodos de cobre é que, após a soldagem de 50 pontos de solda aproximadamente, ocorre a formação de uma camada de difusão (camada de latão) na face dos eletrodos, ocasionada pela presença de pressão e calor, inerente ao processo de soldagem a ponto. Infelizmente, o latão tem uma maior resistência ao fluxo de corrente elétrica do que o cobre dos eletrodos, fazendo com que um calor excessivo seja gerado nessa região, superaquecendo e recozendo o cobre do eletrodo, podendo resultar também na aderência do eletrodo à chapa. Desta forma, o cobre com dureza menor se deforma numa taxa maior, fazendo com que o diâmetro do eletrodo aumente, reduzindo, assim, a densidade de corrente atuante para formar o ponto de solda. O que se deve fazer é aumentar a corrente para que a mesma densidade seja mantida. Isso provoca mais deformação na face do eletrodo devido ao aumento de calor e este ciclo se segue até que o eletrodo esteja completamente desgastado (INTERMACHINERY, 2003, REU, 1997).

A aplicação de soldagem pulsada pode ser uma das formas para minimizar os problemas de desgaste de eletrodos na soldagem de chapas galvanizadas. A técnica de soldagem pulsada é a aplicação de um pulso de corrente para interromper o fluxo de corrente de soldagem e reaplicá-lo novamente uma ou mais vezes sem a liberação da força de soldagem. O primeiro pulso de corrente de soldagem pode ser selecionado de tal forma a fornecer calor suficiente para fundir o zinco, sem criar uma quantidade excessiva de óxido. Após um curto intervalo de resfriamento, o próximo pulso será suficiente para efetuar um solda satisfatória, aço / aço. O resultado é uma boa solda e uma vida útil de eletrodo mais longa. A

expulsão de metal da região da solda pode ser reduzida a zero com a utilização da soldagem pulsada (INTEMACHINERY, 2003, TECNOWELDING, 2004).

Com o desgaste do eletrodo, a densidade de corrente de soldagem diminui em função do aumento da área da face do eletrodo e com isso começam a ocorrer problemas na qualidade do ponto de solda. Para não deixar que os problemas provenientes do desgaste do eletrodo afetem a qualidade da solda, existem alguns procedimentos que devem ser executados e dentre eles podemos destacar: Trocar o eletrodo, trabalhar com curvas de correntes para compensar o aumento da área e contaminação da face do eletrodo e o fresamento dos eletrodos. Vários procedimentos utilizados para minimizar os problemas provenientes do desgaste das capas de eletrodos, durante a soldagem de chapas galvanizadas são descritos a seguir.

- A troca de eletrodos é a prática menos utilizada para minimizar o problema do desgaste. Pois o eletrodo influencia diretamente no custo de produção e produtividade da linha de soldagem. Quando se realiza a troca dos eletrodos, é necessário que a linha de produção seja parada e, em alguns casos, os eletrodos não foram utilizados até seu limite.
- As curvas de corrente ou *steps* de corrente são utilizados nos processos de soldagem a ponto, para determinar o decurso da subida de corrente de soldagem. O valor da corrente de soldagem aumenta com o aumento do número de pontos de solda. Esse procedimento é adotado para compensar o aumento no diâmetro da face do eletrodo e consequente diminuição da densidade de corrente.
- O fresamento de eletrodos é a prática mais recomendada e usada pelas empresas. O fresamento é um processo de usinagem rápido e eficiente utilizado para recuperar o perfil original do eletrodo após alguns pontos de solda.
- Algumas empresas utilizam outro procedimento para minimizar os problemas decorrentes do desgaste dos eletrodos, que é a utilização de uma lima para limpar a face do eletrodo e recuperar o diâmetro original da face. A utilização de lima para fazer a limpeza deve ser evitada. Ela deforma o perfil do eletrodo, não mantendo sempre o mesmo perfil, e com isso modifica os parâmetros do processo de soldagem, pois nem sempre ela consegue manter o mesmo diâmetro e o paralelismo das faces.

I.3. Parâmetros de Soldagem a ponto por resistência e seus efeitos

A qualidade dos pontos de solda é influenciada principalmente por três parâmetros: tempo de solda, intensidade de corrente e força entre eletrodos os quais são aplicados em um ciclo de soldagem. A resistência elétrica da peça não é um parâmetro, mas tem muita importância, pois ela é responsável pela geração de calor devido à oposição à passagem da corrente (efeito Joule).

Os parâmetros de soldagem são funções desses três parâmetros, formados por valores programados em um comando, para execução de um determinado ponto de solda, levando-se em consideração a espessura das chapas, o tipo de material a ser soldado e o tipo de proteção superficial desse material. Existem outros parâmetros, que embora secundários, também influenciam na qualidade do ponto de soldagem. Estes parâmetros são relativos ao tempo em que a pinça se mantém fechada sem a passagem de corrente elétrica (SANTOS, 2006).

I.3.1. Corrente de Soldagem

Segundo a equação 1, a corrente de soldagem tem um efeito muito maior na geração de calor do que a resistência ou o tempo, devido a sua influência quadrática. Sendo assim é uma importante variável a ser controlada.

Tanto a corrente alternada (A.C.) quanto a corrente contínua (D.C.) são usadas para produzir soldas a ponto. A indústria automobilística, com raríssimas exceções, dependia principalmente dos sistemas monofásicos de corrente alternada para a grande maioria de suas operações de soldagem. Com o advento de robôs e a necessidade resultante de componentes leves para a soldagem, um sistema integrado de controle transformador-retificador foi desenvolvido. Este sistema executa soldas com corrente contínua livre de flutuações devido à retificação de uma fonte de energia de alta freqüência, o que representa uma alternativa econômica em relação aos tradicionais sistemas de corrente alternada (SOUZA, 2006).

A máquina de soldagem transforma a alta tensão da linha de transmissão da energia elétrica em baixa tensão e alta corrente. Algumas aplicações usam sistema monofásico de corrente alternada de mesma freqüência como na linha de transmissão de energia elétrica, usualmente 60 Hz.

A corrente de soldagem por unidade de área onde ela é aplicada caracteriza a densidade de corrente de soldagem. As variações na magnitude da corrente podem afetar esta densidade de corrente na interface da solda. Existe um limite inferior para a densidade de

corrente abaixo do qual a fusão não ocorre (Calor suficiente deve ser gerado para compensar as perdas, por condução, para o metal base adjacente e os eletrodos), e também, um limite superior. Se este for muito alto, a espessura total das chapas entre os eletrodos é aquecida até a região plástica quando a zona de solda atingir a temperatura de fusão, e os eletrodos penetram profundamente nas chapas. Isto realmente ocorre quando a corrente é alta o suficiente para produzir expulsão de material da zona fundida e/ou na interface chapa/eletrodo. O resultado é uma vida útil baixa do eletrodo e soldas com baixa qualidade (BRANCO, 2004).

O limite de aceitação constitui o limite inferior e está relacionado diretamente ao diâmetro mínimo do ponto. Uma fórmula aproximada para estabelecer a relação entre diâmetro do ponto e a espessura das chapas soldadas é proposta por KOENIGSBERGER, 1948 *apud* ZHOU, 1999, conforme a equação 2.

$$d = a\sqrt{t} \qquad \textbf{eq. 2}$$

Onde ***a*** representa uma constante estabelecida empiricamente, cujo valor estima-se em torno de 3~6 e ***t*** a espessura da chapa mais fina. De maneira conservadora esta relação indica uma configuração de soldagem que não apresenta falha no metal base (NAKANO, 2005).

I.3.2. Força de Eletrodo

A força de eletrodo é aquela força aplicada às chapas pelos eletrodos durante o ciclo de soldagem. O fechamento do circuito elétrico através dos eletrodos e o material é assegurado pela aplicação desta força. A força é transmitida aos eletrodos de soldagem pela introdução de ar comprimido dentro de um cilindro de ar. A pressão desenvolvida nas interfaces depende da área das faces do eletrodo em contato com as chapas. As funções desta força ou pressão são:

(1) Trazer as várias interfaces a um firme contato;

(2) Reduzir resistência de contato inicial nas interfaces;

(3) Impedir a expulsão do metal de solda da junta;

(4) Consolidar a lente de solda.

A força de eletrodo, usualmente medida e expressa como um valor estático é uma força dinâmica em operação e é afetada pelo atrito e pela inércia das partes da máquina de solda que se movem.

A força do eletrodo afeta a resistência de contato e esta tem efeito dominante na formação do ponto de solda. A resistência *R* na equação 1, é influenciada pela força de soldagem através de seu efeito na resistência de contato da interface entre as chapas. As superfícies das chapas a serem soldadas, em escala microscópica, são compostas por uma série de picos e vales. Quando elas são submetidas à baixa força de eletrodo, o contato real na interface chapa/chapa será apenas nos picos, correspondendo a uma pequena porcentagem da área. Portanto, a resistência de contato será alta. À medida que a força de eletrodo aumenta, os pontos altos sofrem uma deformação e a área de contato na interface chapa / chapa aumenta, decrescendo, assim, a resistência de contato. Na maioria das aplicações, o material do eletrodo possui menor dureza do que as chapas. Conseqüentemente, uma aplicação adequada da força do eletrodo produzirá melhor contato nas interfaces eletrodo / chapa que na interface chapa / chapa (SOUZA, 2006).

Ao aumentar a força de soldagem, a corrente de soldagem também deverá ser aumentada até um valor limite. O efeito no calor total gerado, entretanto, pode ser inverso. À medida que a força aumenta, a resistência de contato e o calor gerado na interface diminuem.

A força do eletrodo deve ser suficiente para conter o metal fundido dentro dos parâmetros dimensionais da face do eletrodo. Se a força for baixa, pode ocorrer expulsão de material na superfície externa da chapa, expulsão de material na interface chapa / chapa e desgaste prematuro do eletrodo. Quando a força é muito alta a resistência de contato na superfície dos dois metais será baixa, reduzindo assim o calor gerado nesta área. Com isso, os pontos de solda formados com alta força do eletrodo, tipicamente exibirão impressão excessiva na superfície externa da chapa, pontos de solda com diâmetro abaixo do especificado ou até mesmo a falta de fusão (BRANCO, 2004).

I.3.3. Tempo de Soldagem

Pela Equação 1, observa-se que, mantendo-se a resistência total constante, a quantidade de calor gerado em qualquer parte do circuito é proporcional ao tempo de soldagem e ao quadrado da corrente de soldagem. O tempo requerido para obtenção de um diâmetro adequado de ponto de solda pode ser diminuído até um valor limite, independente de quanto a corrente de soldagem é aumentada. A taxa de geração de calor deve ser tal que soldas com resistência mecânica adequada sejam produzidas sem aquecimento excessivo dos eletrodos e a sua consequente deterioração.

O efeito do tempo de soldagem na distribuição de temperatura nas chapas e eletrodos é mostrado através das duas curvas na figura I.3. A curva à esquerda representa a temperatura em cada região após cerca de 20% do tempo de soldagem ter sido atingido e mostra que o aumento da temperatura nas superfícies sobrepostas das chapas, durante este período, é proporcionalmente mais baixo do que em outras regiões em relação ao aumento da temperatura durante o tempo de soldagem final.

O processo de solda a ponto normalmente tem diferentes etapas. O tempo de cada etapa deve ser precisamente controlado mesmo que cada um dure apenas uma fração de segundo. O tempo usado é medido em ciclos ou em milissegundos. A figura I.1 mostra os principais tempos de soldagem utilizados em soldagem por resistência.

Outros efeitos dos parâmetros de soldagem na geração de calor podem ser:

- As condições das superfícies das chapas a serem soldadas influenciam na geração de calor porque a resistência de contato é afetada por óxidos, sujeira, óleo e outros contaminantes na superfície.
- A composição química de um metal determina seu calor específico, temperatura de fusão, calor latente de fusão e condutibilidade térmica. Estas propriedades governam a quantidade de calor requerida para fundir o metal e produzir uma solda.

I.4. Aços “Interstitial Free” (IF)

A pesquisa e o desenvolvimento dos aços “Interstitial Free” (IF) ou aços livre de intersticiais, teve início na década de 70 com o objetivo principal de fornecer aos aços características de maior conformabilidade para a aplicação em chapas. O primeiro aço IF com características comerciais foi produzido por volta de 1970, como um aço com extra-baixo teor de carbono estabilizado ao titânio (FUKUDA e SHIMIZU, 1972). Ainda no início da década de 70, foram publicados os primeiros trabalhos, com aços IF estabilizados ao nióbio. Sobre a textura de chapas de aços com baixo carbono, HOOK et al. (1975) estudaram a influência da adição de nióbio sobre a textura de aços IF para aplicações em estampagem profunda. Estes aços são altamente conformáveis e soldáveis sem ponto de escoamento definido, conforme figura I.4 e figura I.5.

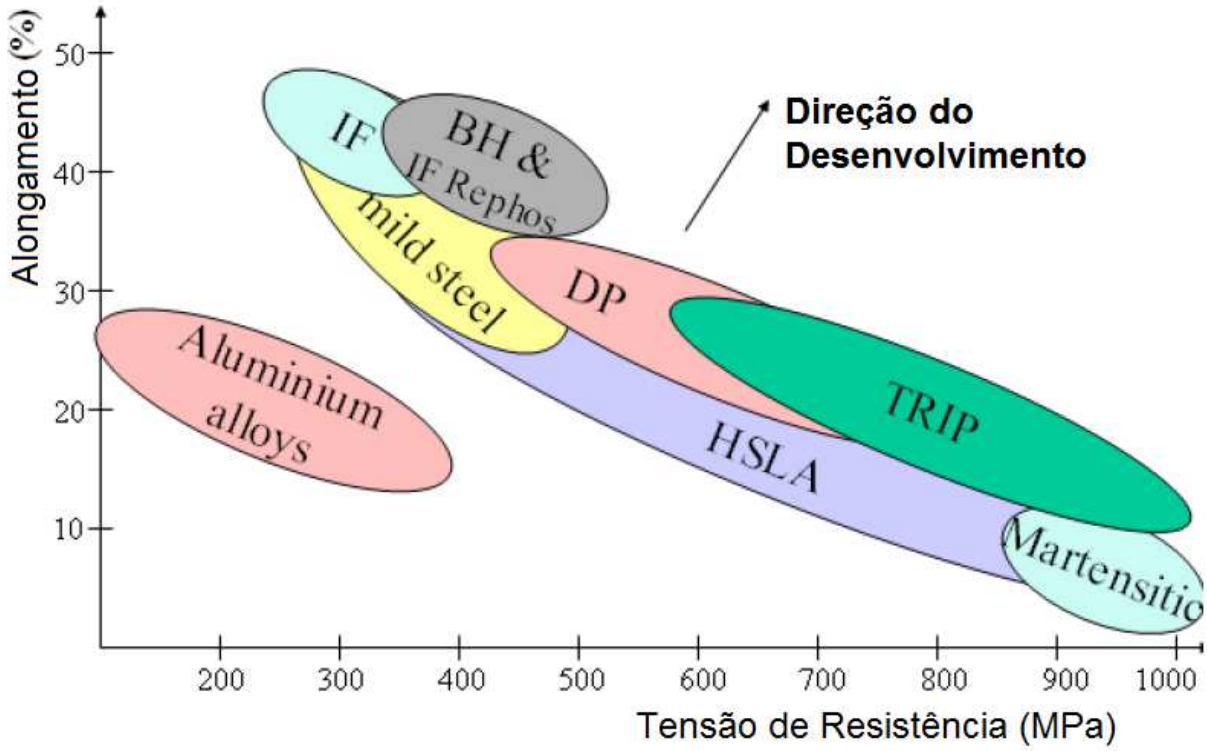


Figura I.4 – Gráfico com relação entre alongamento e resistência em aços automotivos (IOANNOU, 2009).

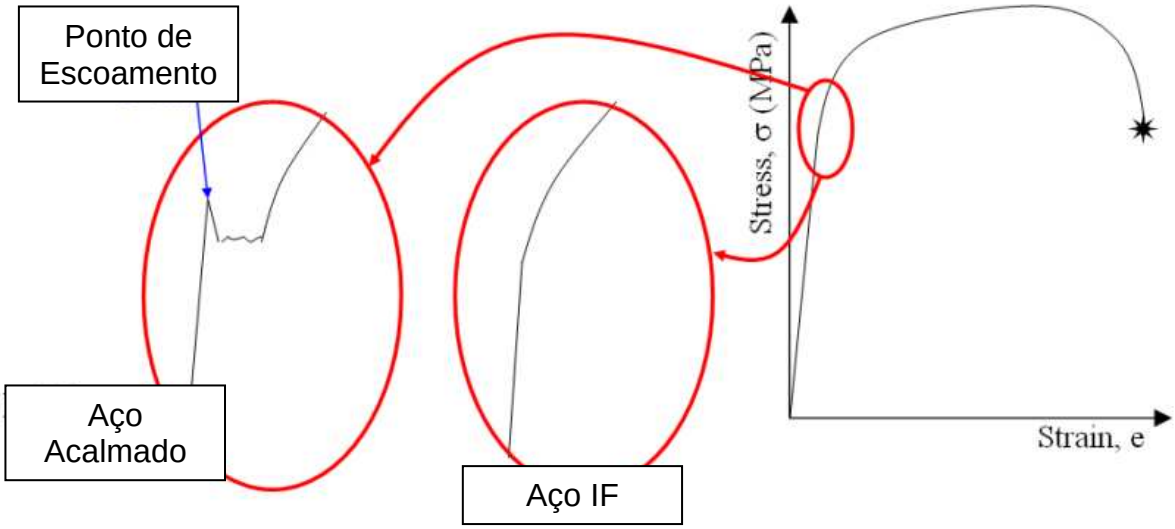


Figura I.5 – Gráfico de tensão deformação em aços IF.

Os aços IF começaram a ser produzidos em grande quantidade a partir de 1979, em substituição aos aços baixo carbono acalmados ao alumínio, quando as chapas de aço galvanizadas por imersão a quente começaram a ser utilizadas para confecção de painéis automotivos com elevada resistência à corrosão. Em função das características dos aços IF e do tipo de processamento feito nas linhas de galvanização, não existe atualmente uma classe de aços mais adequada para a produção de chapas com excelente conformabilidade. Seu uso não só reduziu o custo de manufatura das peças estampadas como também lhes proporcionou maiores níveis de qualidade (TOKUNAGA E KATO, 1990).

Nos últimos anos, a produção em escala comercial dos aços livre de intersticiais apresentou grande crescimento. A produção da Nippon Steel duplicou no período de 1986 a 1992 (TAKESHI, 1994). Em 1990, todos os produtores japoneses de aço manufaturaram uma quantidade total de mais de 3 milhões de toneladas de aços IF (TSUNOYAMA et al., 1990). Na Europa e América do Norte, a produção de aços IF também se desenvolveu em ritmo acelerado. Dados da Thyssen Stahl AG (BLECK, 1991) mostraram um crescimento no período de 1983 a 1990, de aproximadamente 400 mil toneladas. Além dos grandes centros siderúrgicos, a produção comercial dos aços IF já foi iniciada na Coréia do Sul, e seu desenvolvimento científico e tecnológico já atinge outros países, entre eles o Brasil (PRADO et al., 1991).

Os aços IF têm sido adotados com sucesso nos últimos anos na fabricação de painéis para a carroceria de automóveis. Eles apresentam níveis muito altos de estampabilidade em função de seus baixos teores de átomos intersticiais, como C e N, que são menores que 0,003 e 0,004%, respectivamente. Essa condição lhes proporciona baixo limite de escoamento e alta resistência à redução de espessura durante a deformação a frio. Os aços IF também não

sofrem envelhecimento, uma vez que o carbono está totalmente combinado na forma de precipitados (SILVA, 2006).

Os aços IF normalmente possuem microestrutura do substrato basicamente de ferrita equiaxial (tamanho de grão ASTM, igual a 8,5 (17*μm*)) com carbonitretos de nióbio / titânio (agentes fixadores do carbono e nitrogênio) conforme figura I.6. O teor de carbono dos aços IF é inferior ao limite de solubilidade do carbono na ferrita, portanto, não existe a presença de perlita nestes aços. Além disso, o baixo teor intersticial e a adição de elementos de estabilização, como o titânio ou o nióbio, eliminam o envelhecimento por deformação e por aquecimento.

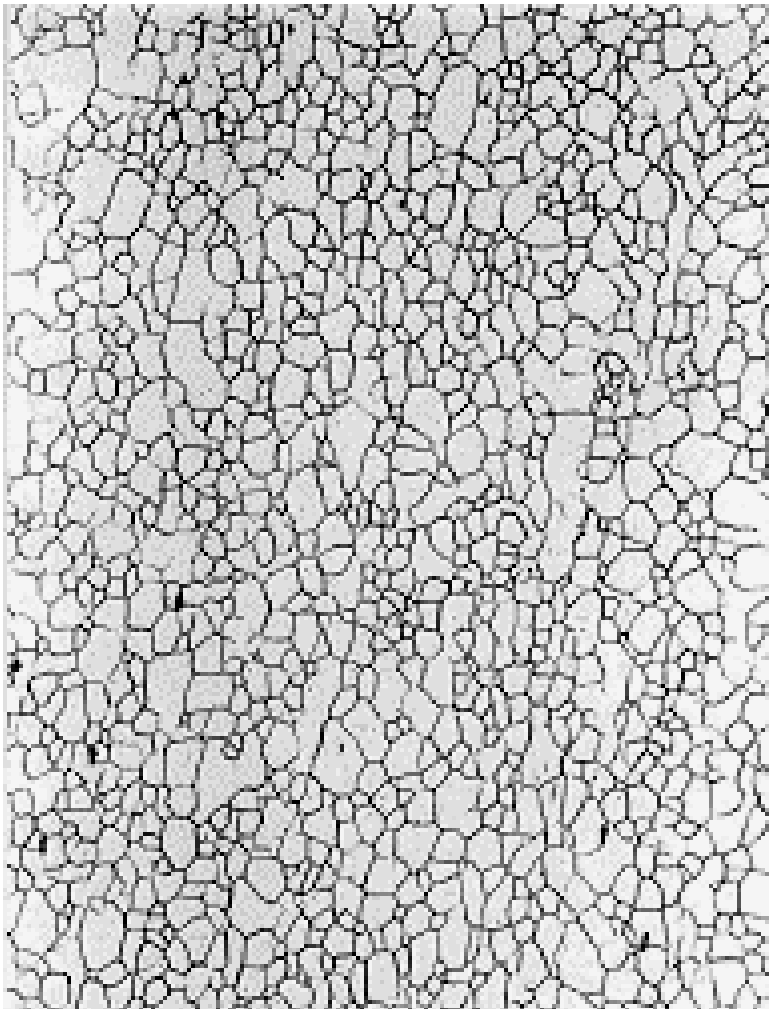


Figura I.6 – Microestrutura de um IF, com ataque de Nital (MIRANDA, 2007).

A figura I.7 mostra a localização da soldagem a ponto por resistência na fabricação de veículos. Já a figura I.8 exibe as impressões geradas por este processo de soldagem em um automóvel moderno, fabricado com chapas aços IF.

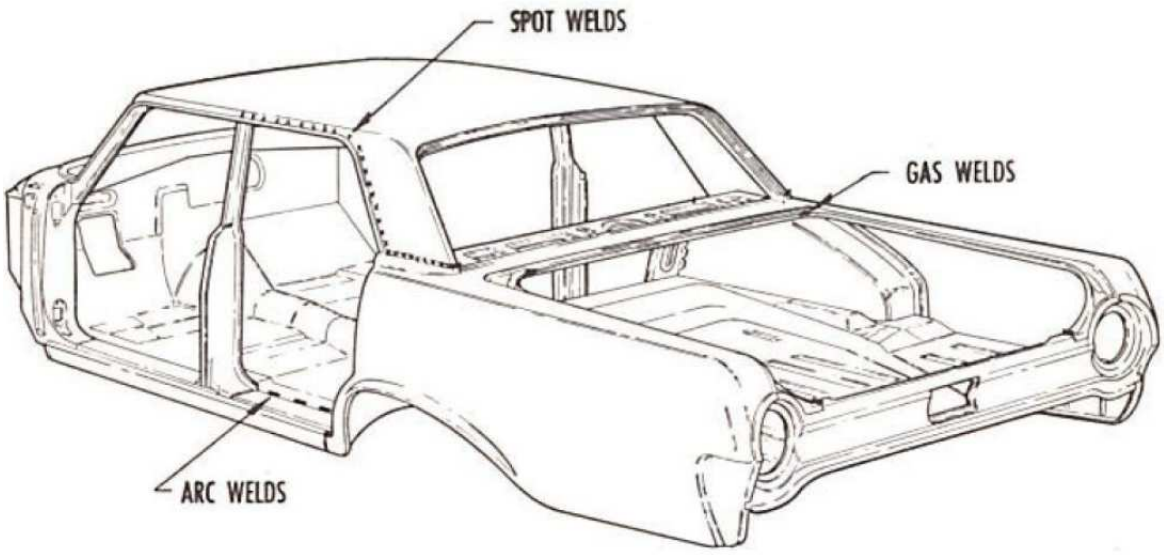


Figura I.7– Regiões de solda descritas em automóvel.



Figura I.8 – Impressões geradas através de soldas por resistência em chapas de aço IF em automóvel recém fabricado.

Capítulo II – Metodologia Experimental

II.1 Material

O material dos corpos de prova utilizados, no presente estudo, para os ensaios experimentais e de calibração do equipamento foi o aço IF revestido pelo processo de imersão a quente cujo substrato é composto de aço livre de intersticial (IF) ao titânio com revestimento nominal de zinco de 60 *g/m²* e 0,75 *mm* de espessura, fabricado pela empresa CSN GalvaSud S.A. A composição química do material das chapas metálicas utilizada está disposta na tabela II.1 e as propriedades mecânicas na tabela II.2.

Tabela II.1: Composição química do aço IF utilizado (%)

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

Tabela II.2: Propriedades mecânicas do aço IF utilizado

	Limite de Escoamento (*MPa*)	Limite de Resistência (*MPa*)	Alongamento (L=80)	Dureza (*HRB*)	Rugosidade (*μm*)
	182	**296**	**43**	**37**	**0,8 - 0,7**
Mín.	140	270	40	-	0,7
Máx.	240	330	99	-	1,5

II.2 Soldagem

II.2.1. Máquina de Solda.

Para realizar os pontos de solda, foi utilizada uma máquina de solda a ponto estacionária marca ULTRASOLDA de 150 *kVA*, refrigerada a água, com regulagem da potência da máquina, corrente alternada, com acionamento pneumático por pedal, conforme mostrado na figura II.1.

Foram ajustados os cabos e mangueiras de ar e água da máquina, deixando-os sem dobras e vazamentos. Os braços e porta-eletrodos foram alinhados e apertados para resistir às pressões exercidas pelo cilindro de ar e também não apresentarem alta resistência à passagem da corrente elétrica.

O ajuste da corrente de soldagem desta máquina é feito através do ajuste da potência do transformador, ou potência de solda.

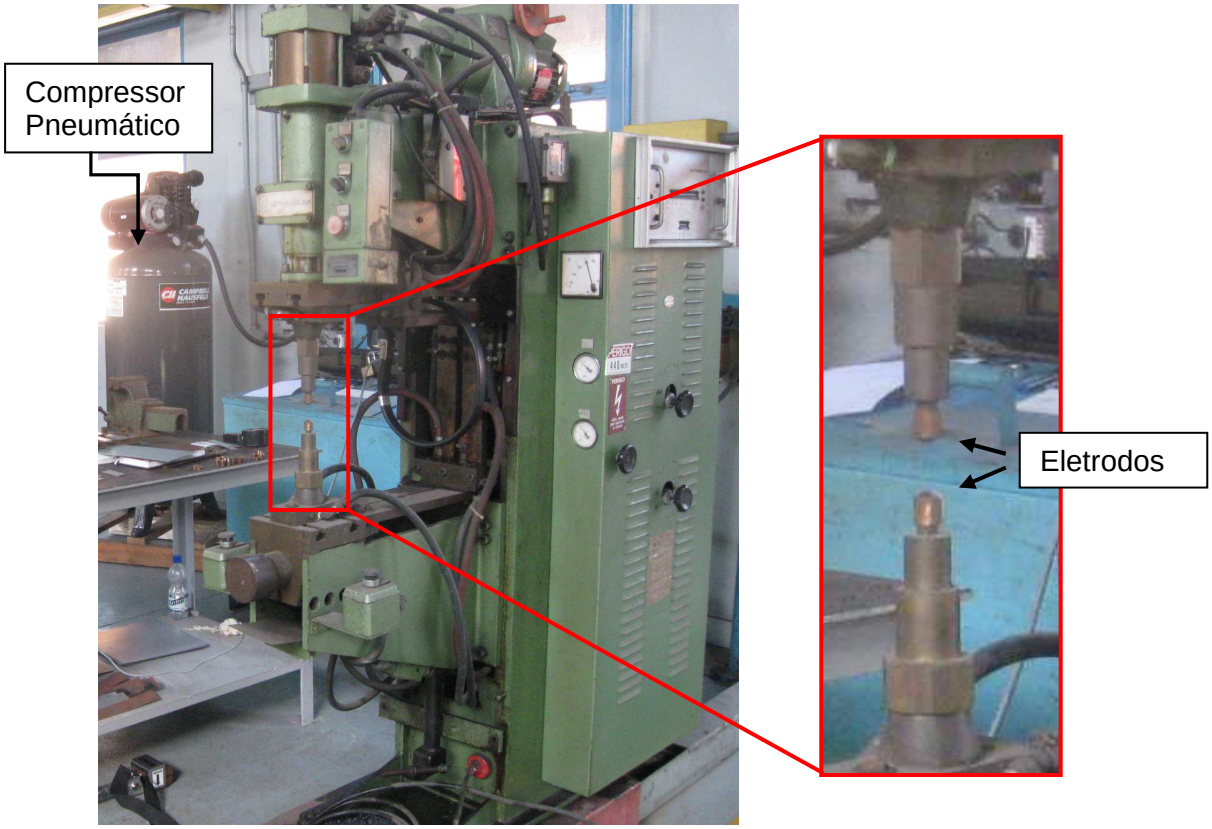


Figura II.1 – Máquina de Solda a ponto.

II.2.2. Eletrodos.

As capas de eletrodos utilizadas no presente estudo para as soldagens são do Tipo 2, (RWMA 2.18200), fabricadas através do processo de Usinagem com uma composição de Cu/Cr e dureza de 75*HRB*. As capas de eletrodos são do tipo cone truncado, fêmeas com cone interno 1:10, diâmetro da face de 5*mm*, altura de 20*mm*, diâmetro do corpo de 16*mm* como indicado na Figura II.3.



Figura II.2 – Capa de eletrodo utilizada.

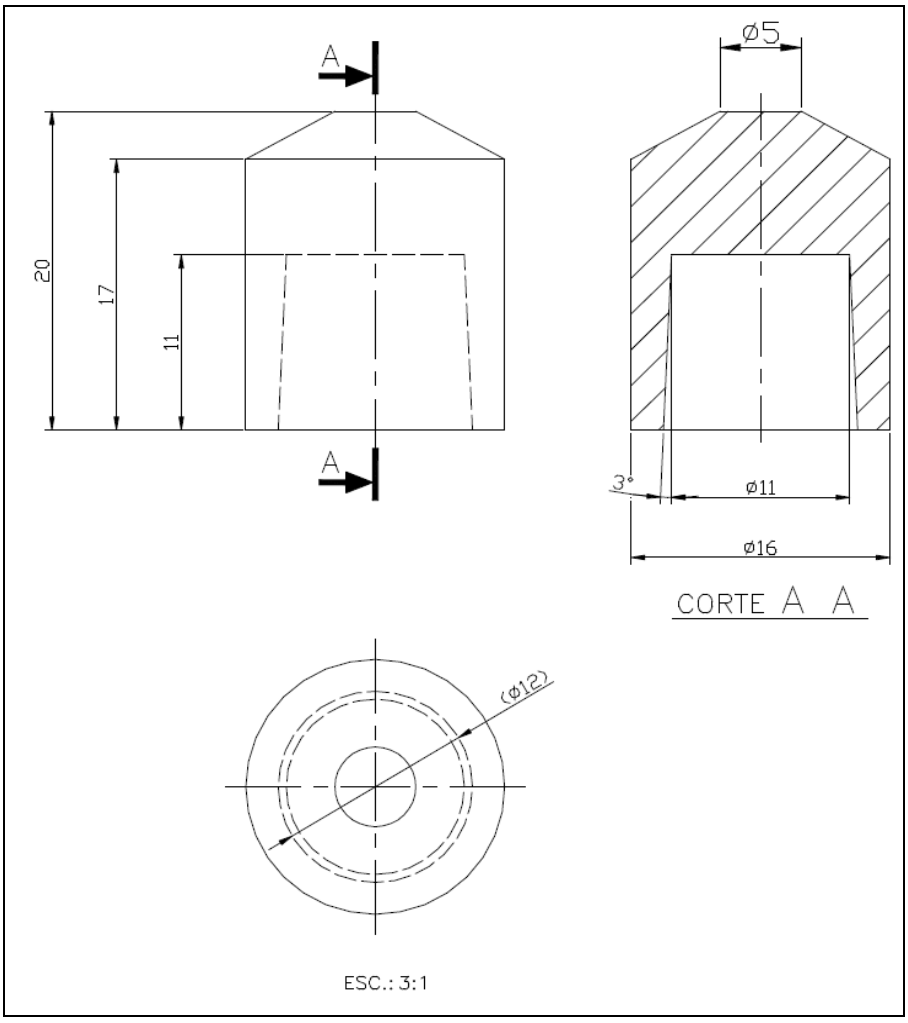


Figura II.3 – Dimensões da capa de eletrodo utilizada (*mm*).

II.2.3. Equipamento de Calibração.

Antes do inicio dos experimentos foi executado um procedimento de calibração da máquina de solda a ponto em relação aos parâmetros de soldagem (Tempo, Corrente e Pressão) com a finalidade de garantir precisão dos valores. Para a medição do tempo e corrente de soldagem, foi utilizado um medidor de parâmetros Miyachi MM-380A, e faixa de corrente de 0,01 – 200 *kA*. Para a calibração da corrente e pressão foi utilizado um sensor corrente/força digital Miyachi MA-771A, com célula de carga com faixa de 50 – 1000 *kgf*, como mostrado na Figura II.4 e II.5.

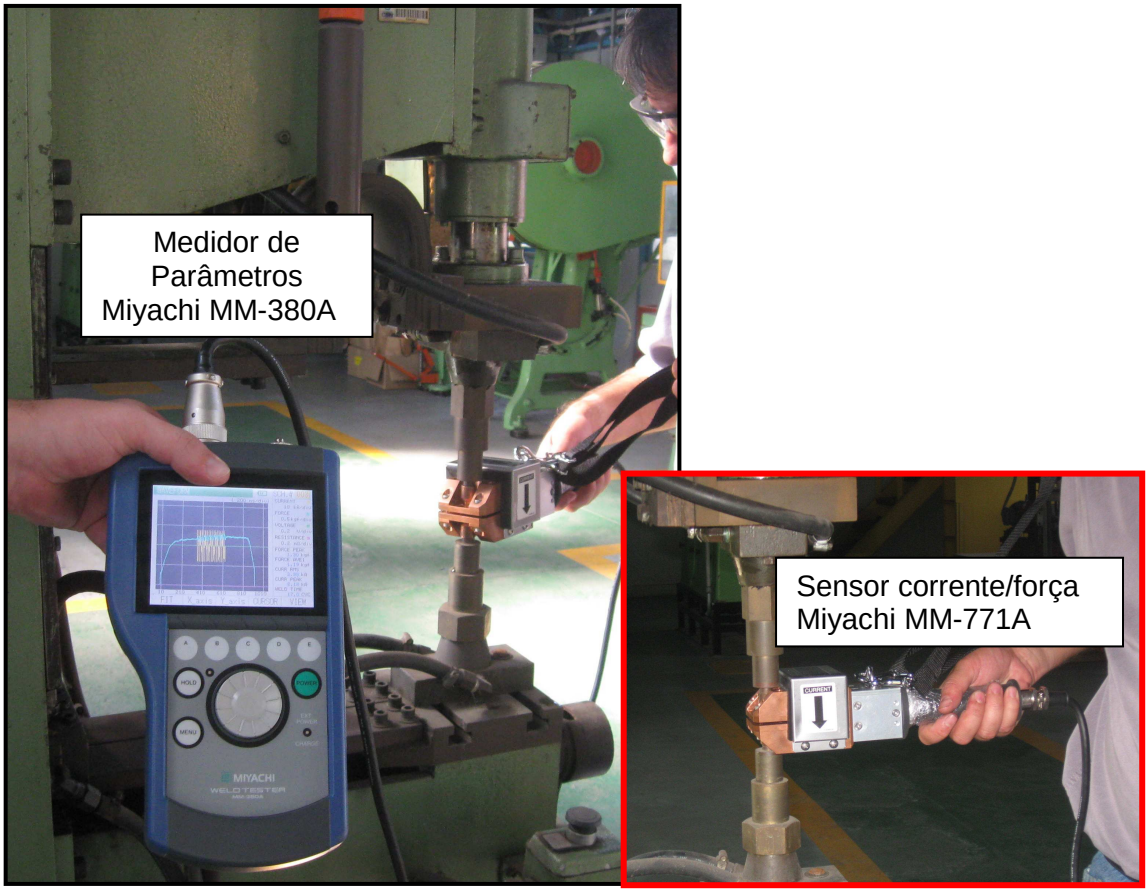


Figura II.4 – Equipamentos de Calibração.

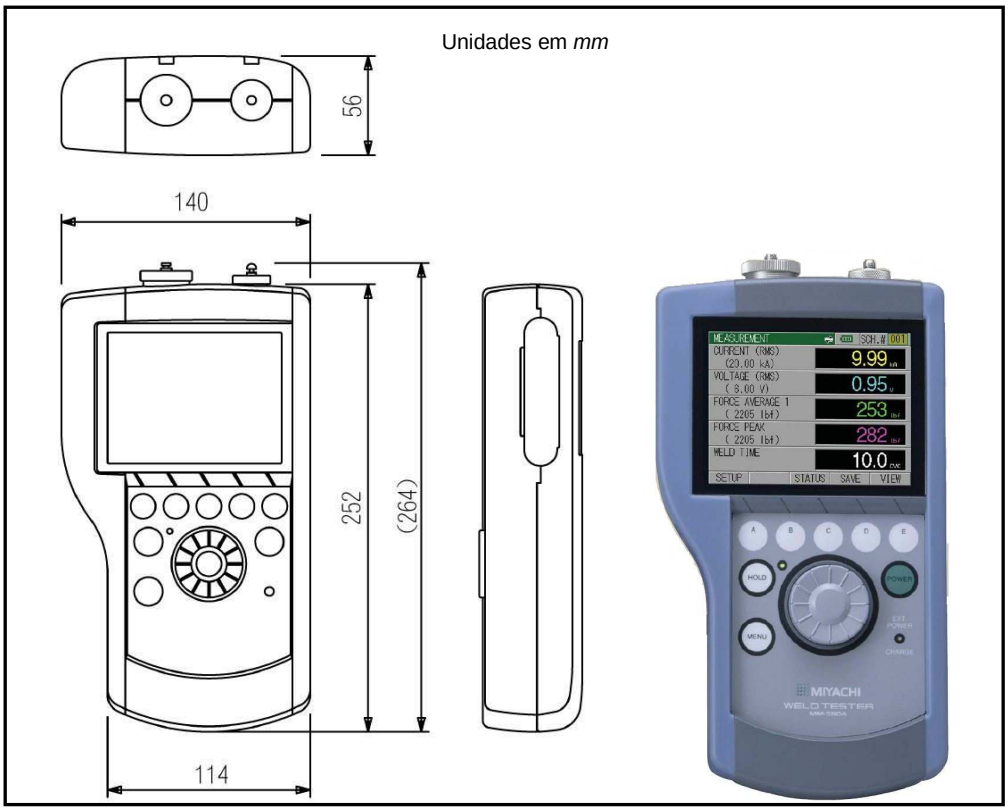


Figura II.5 – Dimensões do equipamento de Calibração - Miyachi MM-380A.

O processo de calibração consiste em regular na máquina os valores de tempo, corrente e pressão de soldagem. Foram posicionadas duas chapas sobrepostas, conforme figura II.6, do mesmo material utilizado no presente estudo, entre os eletrodos e foram executados pontos de solda. O sensor corrente/força foi posicionado entre os eletrodos, atentando para que o centro da área de detecção estivesse perfeitamente alinhado com o centro dos eletrodos e a força fosse aplicada perpendicularmente entre o sensor, conforme figura II.7. Sua conexão com o medidor de corrente capturava e armazenava os gráficos e valores de corrente e força dos eletrodos para a calibração.

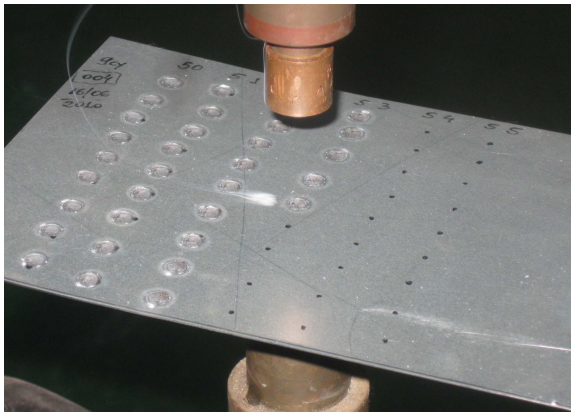


Figura II.6 – Chapas sobrepostas para calibração de parâmetros.

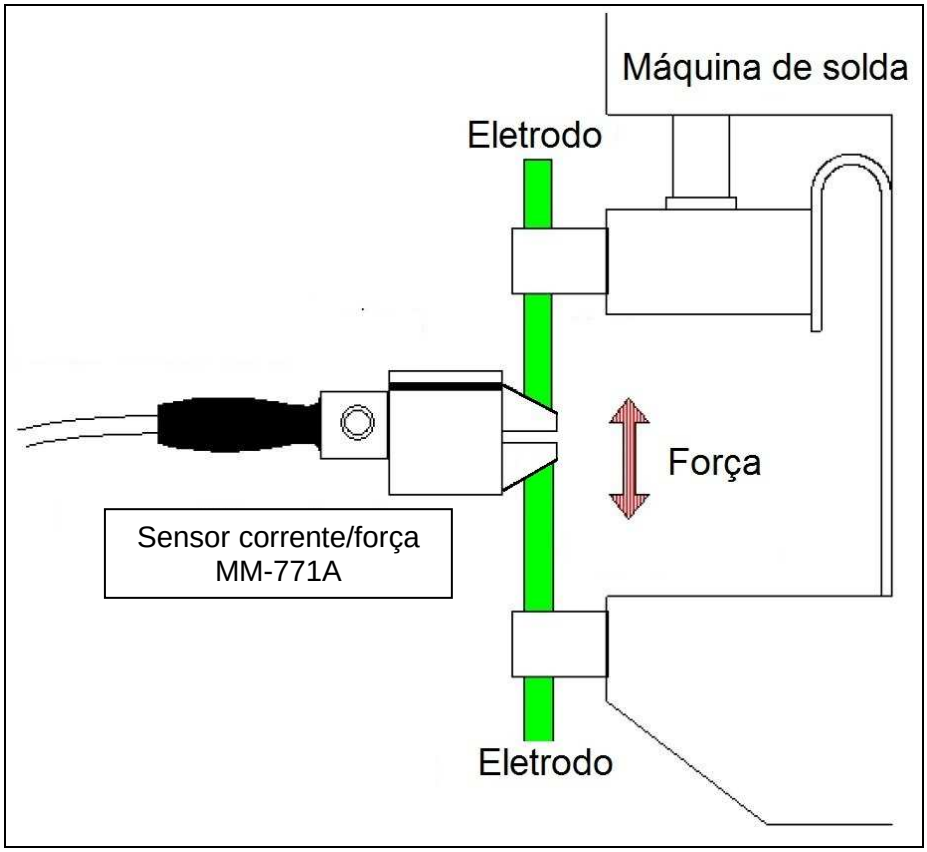


Figura II.7 – Alinhamento do sensor corrente/força.

II.2.4. Parâmetros de Soldagem.

Para selecionar os parâmetros de soldagem a serem utilizados neste estudo, foi necessário, primeiramente levantar o Gráfico de Soldabilidade do material. Este gráfico, conforme figura II.8, é um dos métodos eficazes para avaliar a soldabilidade de um material, bem como a qualidade da solda subsequente. Este gráfico é utilizado para estabelecer a faixa de corrente de soldagem a ser utilizada (MANSUR, 1998).

O limite inferior, ou seja, a curva à esquerda é definida como a combinação de tempo e corrente que resulta em um diâmetro de lente de solda de 80% do diâmetro da ponta do eletrodo, ou seja, $4\sqrt{t}$ como mostrado no item I.3.1. A região à esquerda desta curva representa lentes de solda com diâmetros insuficientes ou que exibem rompimento interfacial durante testes e são consideradas inaceitáveis.

O limite superior, ou seja, a linha à direita, é definida como a combinação de tempo e corrente de soldagem que resulta em um diâmetro de lente de solda de $5\sqrt{t}$, acima do qual ocorre expulsão do material fundido da região da solda. A expulsão ocorre quando a força do eletrodo não consegue mais confinar a poça de metal fundido na região da solda. Na região à direita desta curva por haver expulsão de material, as lentes de soldas são consideradas inaceitáveis.

O diâmetro da solda obtida é medido após a realização do ensaio de arrancamento. O aspecto de um gráfico de Soldabilidade para uma dada espessura depende de vários fatores, tais como: a força do eletrodo, seu diâmetro, a taxa de resfriamento (tempo de retenção), a resistência elétrica das superfícies de contato. Ao se aumentar o valor da força do eletrodo, a curva se desloca para direita já que as resistências elétricas diminuem, fazendo com que uma maior corrente seja necessária para ser mantido o mesmo efeito Joule.

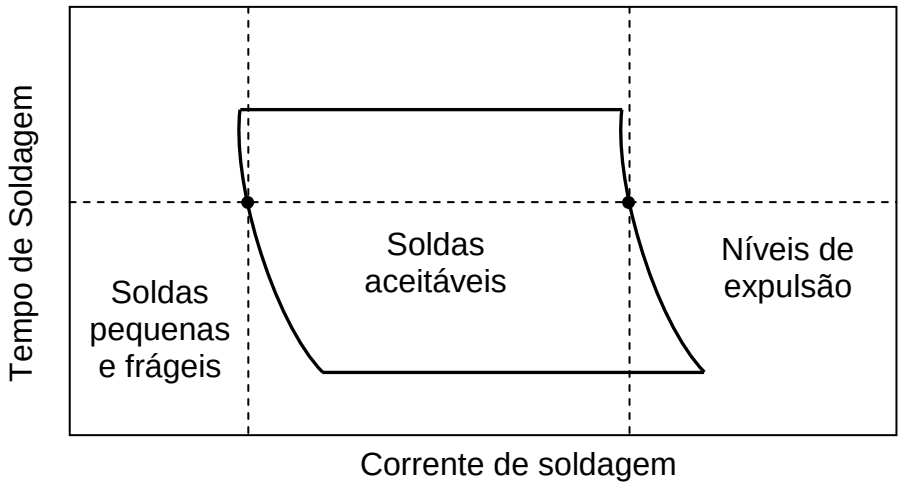


Figura II.8 – Exemplo de uma curva de soldabilidade.

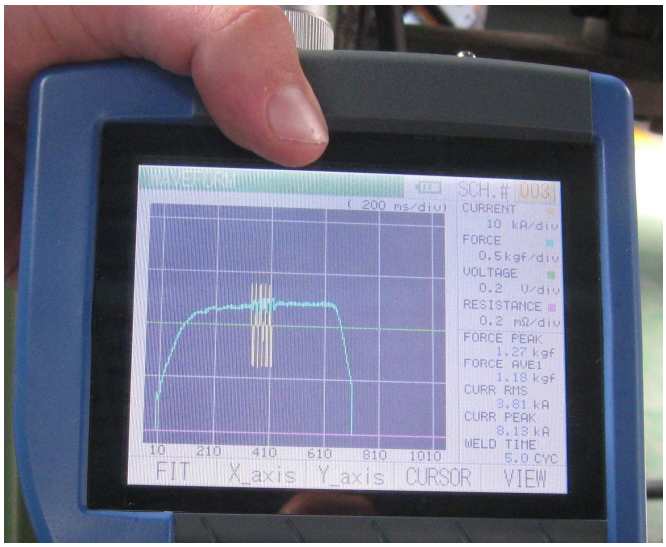


Figura II.9 – Gráfico da corrente do medidor de parâmetros digital.

É possível, portanto, estabelecer uma faixa de corrente para a qual soldas a ponto com diâmetros de solda aceitáveis sejam obtidas para um determinado tempo de soldagem. Essa faixa aceitável pode ser estendida para outros tempos de soldagem para produzir uma região entre as duas curvas em forma de lóbulo, dentro da qual as soldas são consideradas aceitáveis. A faixa aceitável de corrente, ou seja, a distância entre as duas curvas é usualmente uma medida de soldabilidade dos aços. Desta forma, quanto maior for a distância entre as duas curvas, ou seja, quanto maior for a faixa de corrente, maior será a soldabilidade do material (MANSUR, 1998).

No presente estudo as faixas de corrente aceitáveis foram determinadas a partir de soldagens variando a força dos eletrodos e a potência da máquina de solda, como pode ser observado na listagem abaixo. A força foi calibrada através da pressão no sensor corrente/força utilizando equipamento específico para tal fim conforme abordado no item II.2.3.

Como informado anteriormente, o ajuste da corrente de soldagem da máquina de solda é feito através do ajuste da potência do transformador. Esta potência da máquina solda foi configurada na própria máquina, porém para certificar o valor correto da corrente de soldagem foi utilizado um medidor de parâmetros e um sensor corrente/força digital conforme demonstrado no item II.2.3.

Como a frequência da rede elétrica é de 60 *Hz*, logo 1 ciclo, em inglês *“cycle”* (*cy*), tem a duração de: 1/60, ou seja, 0,0167*s*.

Os parâmetros de solda foram escolhidos de forma a atender o critério do diâmetro mínimo do ponto de solda, além de evitar defeitos como soldas com diâmetro do ponto, deslocado, queima da superfície da chapa, fusão da superfície da chapa. Os parâmetros de soldagem definidos foram os seguintes:

Pressão entre os eletrodos: 200 e 290 *kgf*

Potência da máquina de solda: 49 a 58%

Tempo de Solda: 6 a 11 *cy*

Tempo de compressão: 35 *cy*.

Tempo de retenção: 5 *cy*.

Tempo de Pausa: 82 *cy*.

Taxa de soldagem: 27 *soldas/min*.

Resfriamento: 4 *l/min*.

Distância entre eletrodo: 24 à 27 *mm*.

Diâmetro de contato: 5,0 *mm*.

Diâmetro de solda aceitável: 3,5 à 4,4 *mm*.

Para cada tempo de solda e força entre os eletrodos foram gerados gráficos relacionando o diâmetro da solda e a corrente de soldagem em relação à potência do transformador da máquina de solda. A partir dos dados gerados através das combinações dos parâmetros citados foram gerados gráficos de soldabilidade, com os parâmetros ótimos, através do software Origin®. Em todo o estudo foram realizados cerca de 10.000 pontos de solda sendo que 468 pontos foram analisados conforme mostrado nas tabelas II.3 e II.4.

Tabela II.3: Número de medições iniciais realizadas.

	Força (*kgf*)	Tempo (*cy*)	Potência de Solda (%)	Ensaios	Total
Parâmetros	200 e 290	6,7,8,9, 10 e 11	49,50,51,52,53,54, 55, 56,57 e 58	-Arrancamento; -Cisalhamento; -Tração Axial	-
Medições	2	6	10	3	360

Tabela II.4: Número de medições realizadas após seleção dos melhores parâmetros (força de 200 kgf).

	Nº de Pontos de Solda	Tempo (*cy*) - [Potência de Solda (%)]	Ensaios	Total
Parâmetros	0, 250,500, 750,1000, 1250,1500, 1750 e 2000	8-[52]; 9-[51]; 9-[52] e 10-[51]	-Arrancamento; -Cisalhamento; -Tração Axial	-
Medições	9	4	3	108

O quadro a seguir demonstra os passos utilizados para uma adequada avaliação dos resultados dos processos de soldagem por resistência em aços IF no presente estudo, visando um melhor entendimento de suas etapas.

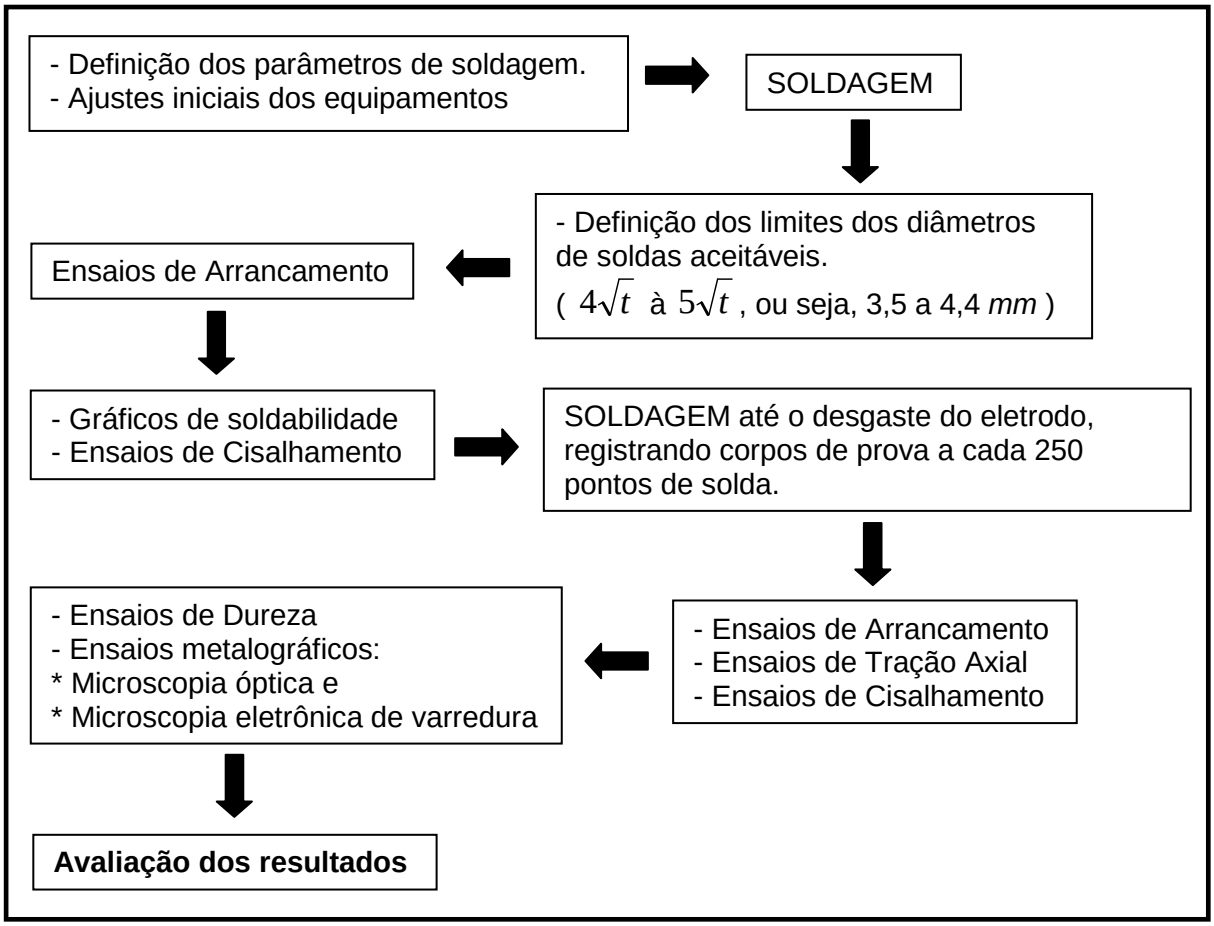


Figura II.10 – Sequência para avaliação da soldagem por resistência.

II.3. Avaliação da resistência da solda e do desgaste.

A cada parâmetro definido no item anterior foram realizados ensaios de arrancamento e ensaios de tração axial e de cisalhamento. Após a seleção dos parâmetros ótimos de soldagem, os pontos de solda foram caracterizados a cada 250 pontos seguindo estas sequências de análises:

- 0; 250; 500; 750; 1000 pontos para condição com parâmetros de 200*kgf*; 8*cy* e 52% da potência de solda.

- 0; 250; 500; 750; 1000; 1250 pontos para condição com parâmetros de 200*kgf*; 9*cy* e 51% da potência de solda.

- 0; 250; 500; 750; 1000; 1250; 1500; 1750; 2000 pontos para condição com parâmetros de 200*kgf*; 9*cy* e 52% da potência de solda.

- 0; 250; 500; 750; 1000; 1250; 1500 pontos para condição com parâmetros de 200*kgf*; 10*cy* e 51% da potência de solda.

A figura II.11 mostra os corpos de prova que foram soldados utilizando-se os parâmetros de soldagem ótimos até o desgaste do eletrodo.



Figura II.11 – Corpos de prova com melhores parâmetros variando a quantidade de números de pontos de solda utilizando pressão de 200*kgf*.

Esta metodologia permitiu avaliar o desgaste do eletrodo através do controle do diâmetro da solda indicando as melhores condições a partir de uma análise qualitativa da superfície da impressão.

II.3.1. Ensaio de cisalhamento.

Para o ensaio de cisalhamento corpos de prova foram cortados na dimensão de 45 x 105*mm* conforme Norma AWS D8.9-97, figura II.12, e soldados conforme parâmetros definidos no item II.2.4. Neste ensaio corpos de prova foram carregados até sua ruptura sobtensão utilizando máquina padrão para ensaio de tração. A avaliação da solda é feita em função do valor máximo da carga utilizada para romper o corpo de prova, assim como o modo de ruptura do ponto que, em chapas de até 2 *mm* de espessura deve apresentar arrancamento da lente de solda de uma das chapas. Foram realizados aproximadamente 120 ensaios.

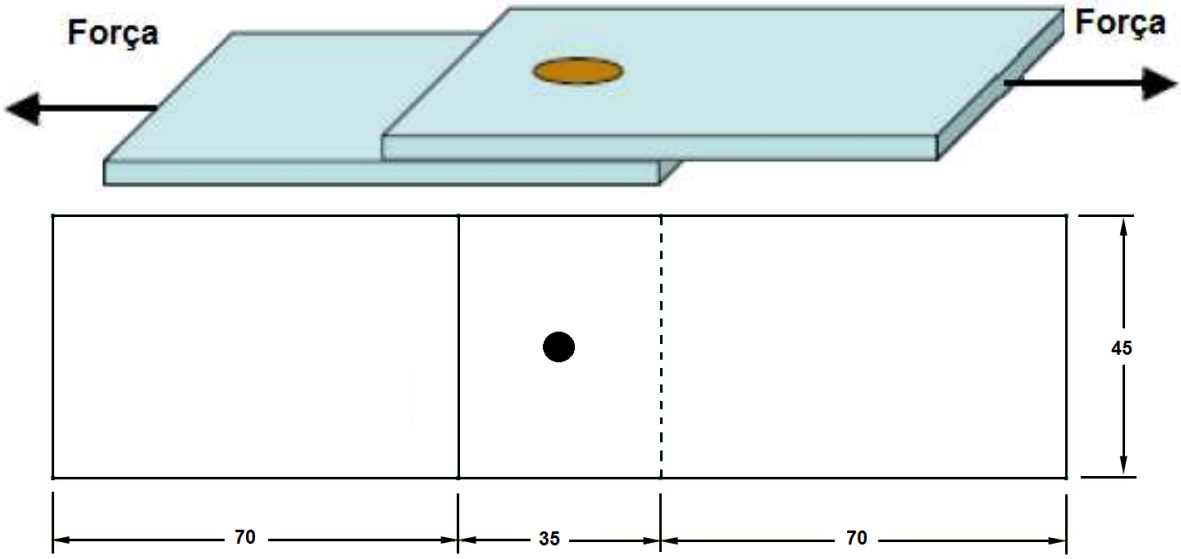


Figura II.12 – Configurações esquemáticas dos corpos de prova para teste de cisalhamento. Dimensões em *mm* conforme AWS/SAE D8.9, 1997.

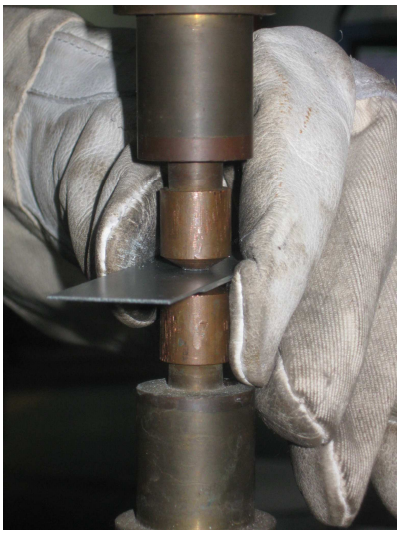


Figura II.13 – Soldagem de um corpo de prova.

II.3.2. Ensaio de tração axial.

Neste ensaio, a solda é tensionada na direção normal à superfície do material. O corpo de prova é dividido em três regiões iguais e suas bordas são dobradas a 90º em dispositivo adequado formando um “U”. Este corpo de prova é soldado com mesmos parâmetros já

definidos, formando uma estrutura em forma de “H” e o conjunto assim formado é, então, tracionado axialmente.

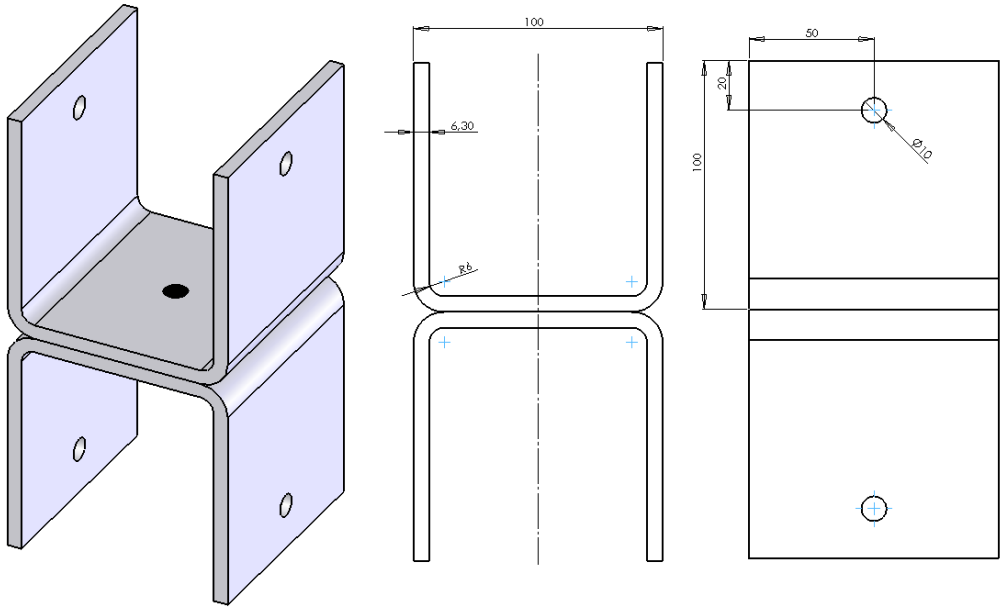


Figura II.14 – Figura de um corpo de prova para ensaio de tração axial (ilustração).

II.3.3. Ensaio de arrancamento.

Este é o ensaio mais comumente usado em soldas a ponto. Ele é usado para determinar a soldabilidade a ponto em todas as especificações automobilísticas. Existem várias razões para o amplo uso deste ensaio: facilidade de execução; baixo custo; utilização em chão de fabrica como um teste de controle de qualidade (MANSUR, 1998).

As mesmas dimensões dos corpos de prova ensaio de cisalhamento foram utilizadas para este ensaio. Após terem sido soldados conforme parâmetros adotados, os corpos de prova foram fixados em um torno de bancada e com um dispositivo apropriado, conforme figura II.15, foram dobrados até o completo arrancamento do ponto de solda. 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 nas figuras II.16 e II.17. Este tipo de ensaio é também sugerido pela Norma AWS D8.9-97 como critério de avaliação de soldas por resistência.

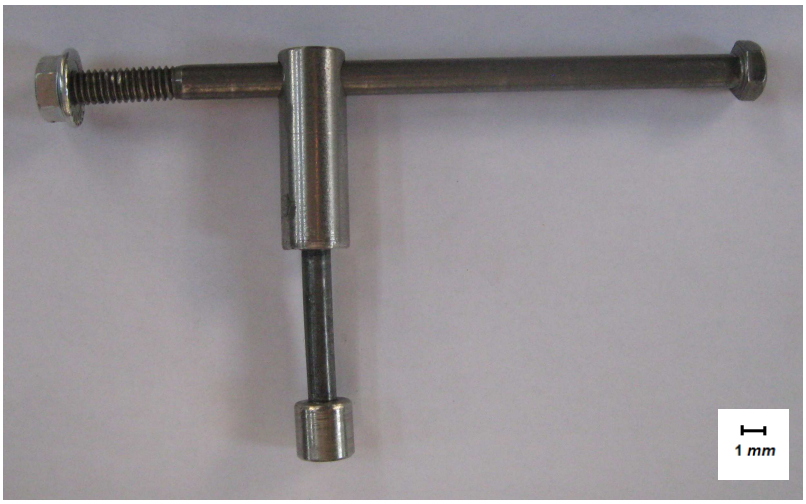


Figura II.15 – Dispositivo para ensaio de arrancamento

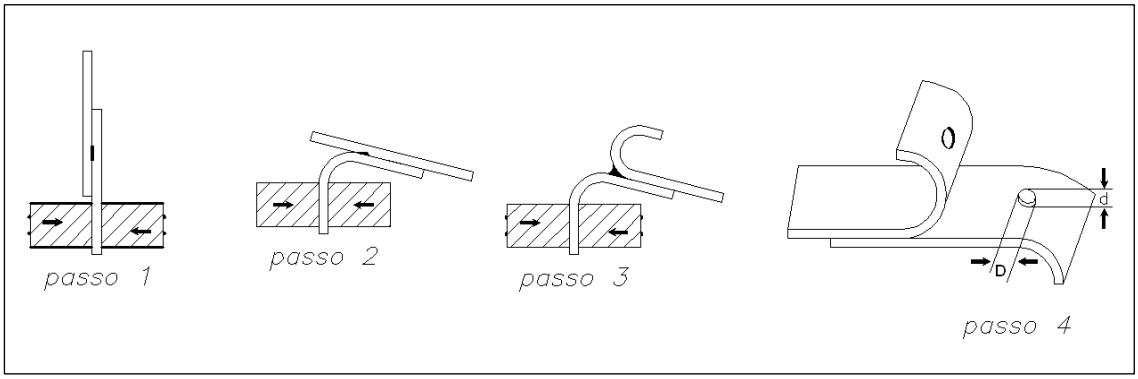


Figura II.16 – Esquema do ensaio de arrancamento

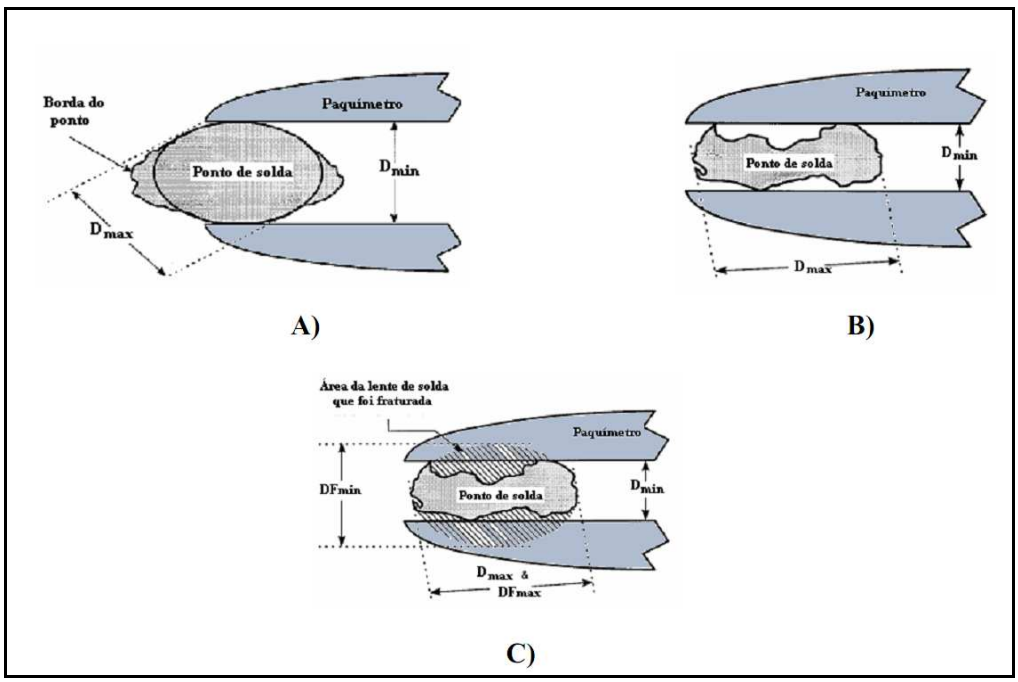


Figura II.17 – Medições dos pontos de solda: sem fratura A e B e com fratura C (AURES, 2006).

II.3.4. Ensaio de microdureza.

Visando analisar se houve alguma alteração microestrutural as soldas foram submetidas ao ensaio de microdureza. Utilizou-se o ensaio de dureza Vickers, que utiliza como penetrador um diamante de forma piramidal com base quadrada. O ângulo interno entre as faces opostas da pirâmide é de 136º. A carga utilizada foi de 200 *gf* e o diâmetro da impressão foi calculado com a média das diagonais do quadrado. A figura II.18 mostra o durômetro Wilson Instruments, modelo 422MVD utilizado para medição de microdureza Vickers. O próprio aparelho fornece a dureza Vickers que é medida dividindo-se a carga pela área da impressão obtida. Este ensaio foi baseado na norma ANSI/AWS/SAE/D8.9-97. A figura II.19 mostra uma seção transversal da solda para ensaio de dureza.



Figura II.18 – Dispositivo para ensaio de microdureza.

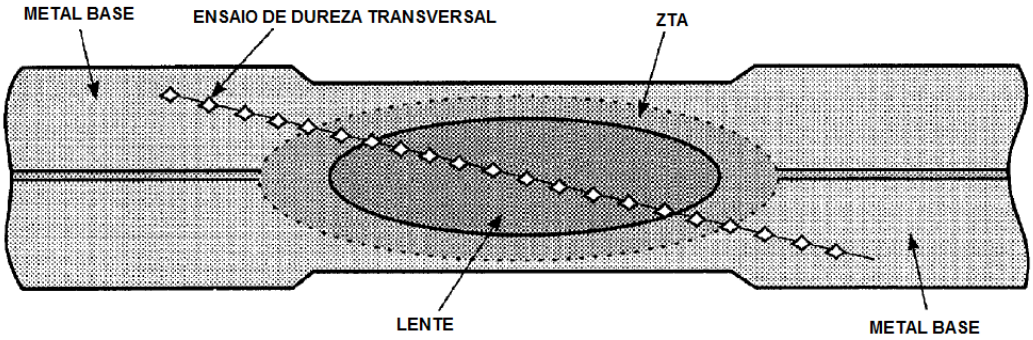


Figura II.19 – Seção transversal da solda para ensaio de dureza.

II.3.5. Ensaios Metalográficos.

Primeiramente, foram realizados ensaios metalográficos para verificar e mensurar o diâmetro (interno e externo) dos pontos de solda descritos no primeiro parágrafo do item II.3, que procedeu levando o material, figura II.11, ao microscópio óptico OLYMPUS BX60MF, figura II.20, realizando desta forma as medições e aquisições de imagens com auxílio do software IMAGE PRO PLUS.



Figura II.20 – Microscópio Óptico utilizado.

A análise microestrutural da junta soldada teve como principal finalidade avaliar a lente, a zona termicamente afetada e o metal base, sendo analisadas através de microscopia óptica (MO) e microscopia eletrônica de varredura (MEV).

Após as medições dos diâmetros do ponto de solda, corpos de prova foram seccionados transversalmente à região da solda para caracterização da lente de solda, sendo selecionados para esta verificação os seguintes parâmetros:

- 0 e 1000 pontos para condição com parâmetros de 200*kgf*; 8*cy* e 52 % (7,68*kA*).

- 0 e 1250 pontos para condição com parâmetros de 200k*gf*; 9*cy* e 51 % (7,47*kA*).

- 0 e 2000 pontos para condição com parâmetros de 200k*gf*; 9*cy* e 52 % (7,79*kA*).

- 0 e 1500 pontos para condição com parâmetros de 200k*gf*; 10*cy* e 51 % (7,44*kA*).

Totalizando 8 amostras de condições distintas.

Estas secções dos pontos de solda foram embutidas com resina de baquelite (polímero na forma de pó). Foi utilizada uma prensa de embutimento Struers (Pronto Press-20) que tem a função de comprimir, aquecer e, por último, resfriar a resina. As amostras embutidas foram devidamente identificadas, seguindo para o processo de polimento que consistiu no lixamento com lixas abrasivas com a seguinte sequência granulométrica: 100, 220, 320, 400 e 600 e polidas com abrasivo de pasta de diamante de 6, 3 e 1*μm*. O ataque químico foi realizado com Nital 10%. O tempo de ataque das amostras foi de aproximadamente 15 segundos.

Após ataque químico, as amostras foram analisadas com o auxílio de um microscópio Olympus U-TV1X, e as imagens captadas usando uma câmera Olympus U-CMAD-2. A medição das dimensões de interesse foi realizada através do software IMAGE PRO PLUS, conforme figura II.22, sendo medidas as seguintes dimensões:

- Diâmetro da ZTA (Zona Termicamente Afetada);

- Diâmetro da lente de solda;

- Altura da lente de solda;

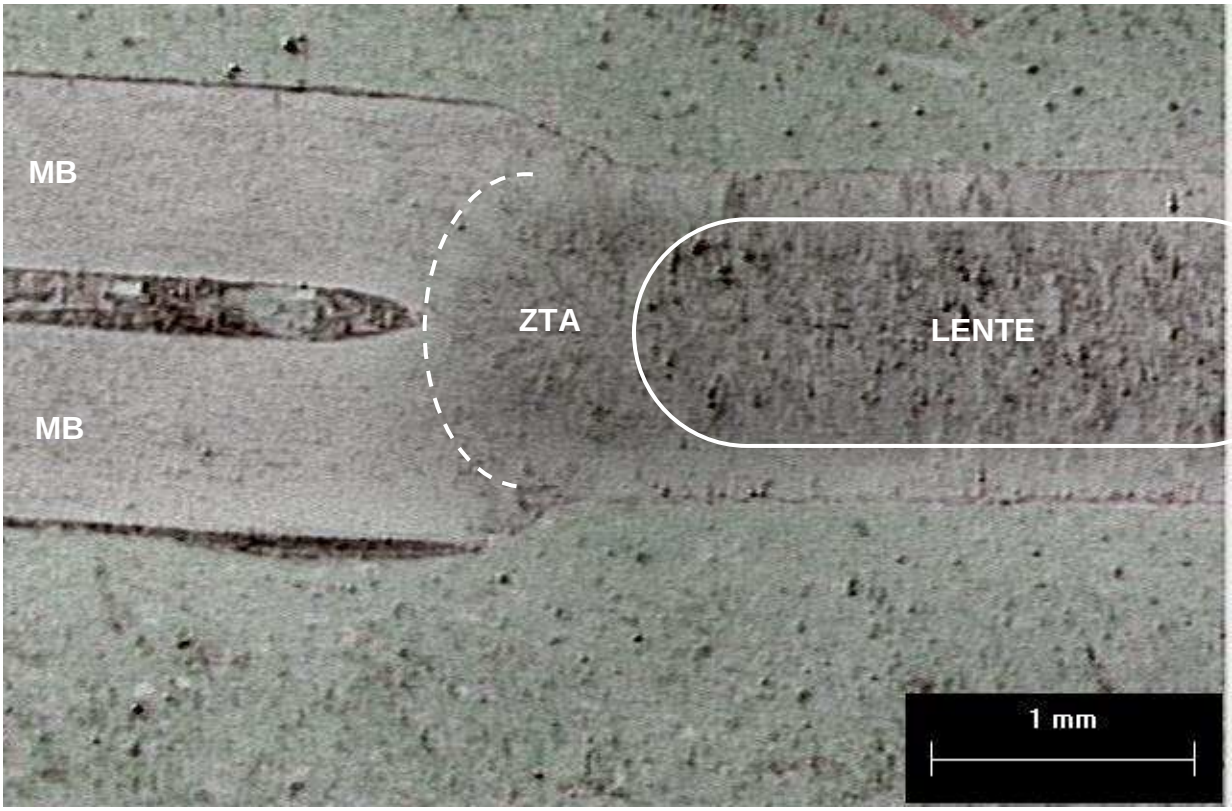


Figura II.21 – Secção transversal de uma solda a ponto por resistência.

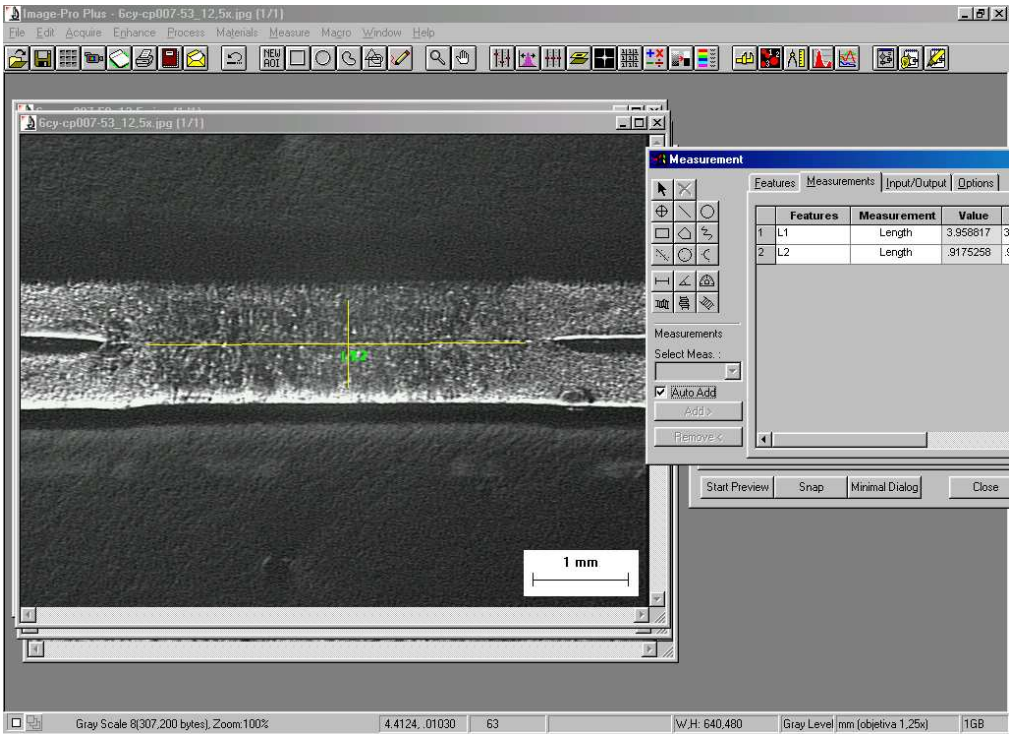


Figura II.22 – Medição da lente de solda através do software Image PRO após micrografia, a parte mais escura da micrografia corresponde a lente de solda a ser medida.

A análise por microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi realizada na CSN. Foi feita uma análise microestrutural do revestimento e da liga intermediária, analisando os elementos

de liga presentes, via análise EDS (espectroscopia de energia dispersiva). Foi usado um microscópio modelo DSM 962 – da marca ZEISS. A figura II.23 apresenta o equipamento utilizado. Esta análise foi realizada para as condições com parâmetros de 200*kgf*; 8*cy* e 52% de potência da máquina de solda (7,84*kA)* e 200*kgf*; 9*cy* e 52% de potência da máquina de solda (7,93*kA)*.



Figura II.23 – Microscópio Eletrônico de Varredura utilizado.

Capítulo III – Resultados e Discussão

III.1. Sistema de aquisição e de monitoração dos parâmetros de soldagem.

Executou-se procedimento de calibração da máquina de solda a ponto garantindo a precisão dos valores dos parâmetros de soldagem como tempo, corrente e pressão. O medidor de parâmetros, Miyachi MM-380A, foi utilizado para a medição do tempo de soldagem que foi de 6 a 11*cy* e a corrente de soldagem que foi medida de acordo com a potência do transformador da máquina de solda, variando de 7,3 a 9,6*kA*. Sendo esta potência selecionada de 49 a 58% conforme indicado na tabela III.2. O valor da força entre os eletrodos foi garantida através do sensor corrente/força digital Miyachi MA-771A, utilizando uma célula de carga para 200 e 290*kgf*. As figuras III.1, III.2 e III.3 mostram a tela do medidor de parâmetros com parâmetros utilizados.



Figura III.1 – Visor do medidor de parâmetros Miyachi MM-380A com 9 ciclos (tempo) e 7,57*kA* (corrente de soldagem).

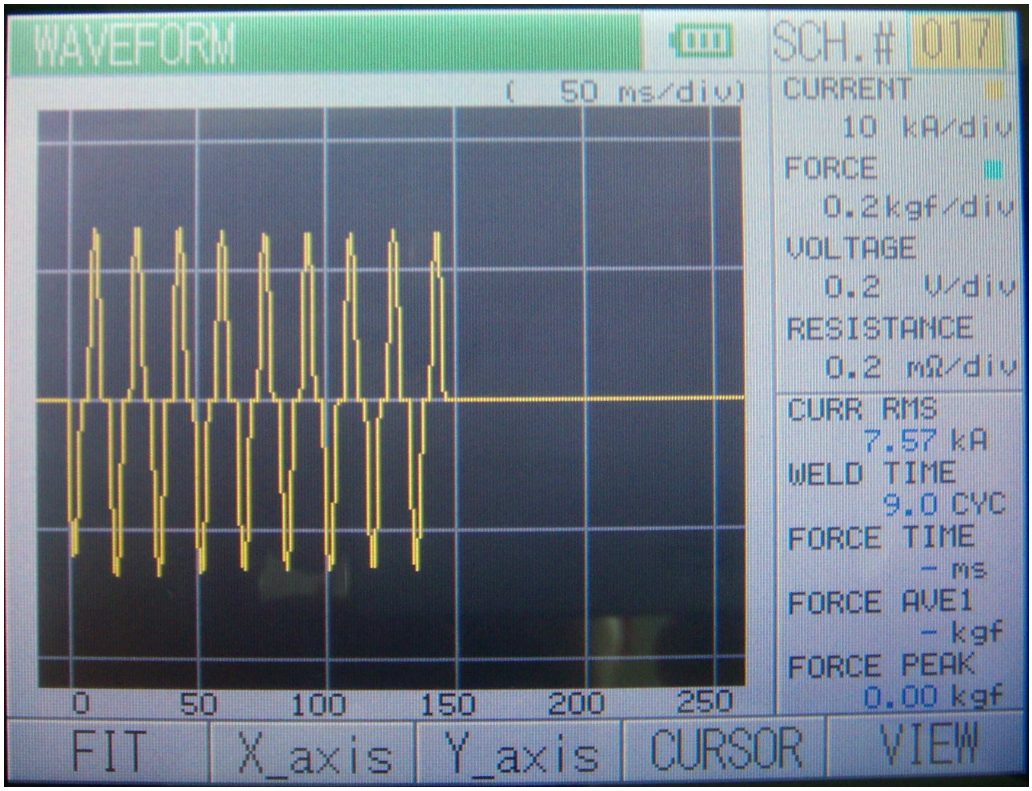


Figura III.2 – Gráfico gerado no medidor de parâmetros Miyachi MM-380A com 9 ciclos (tempo) e 7,57*kA* (corrente de soldagem).

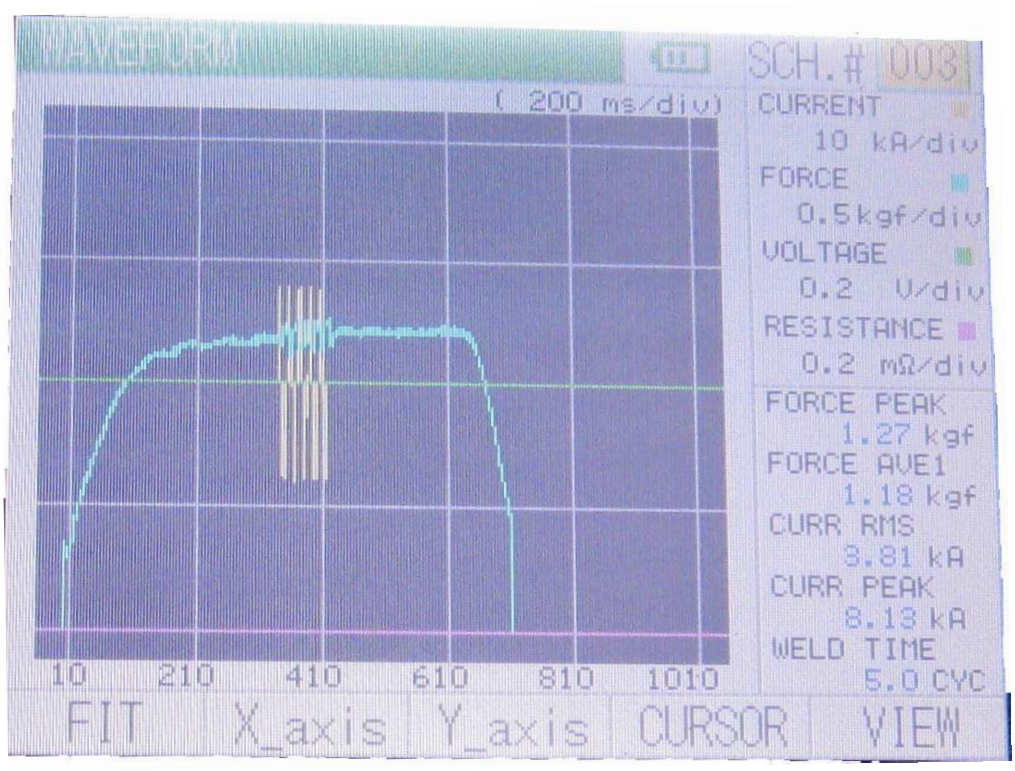


Figura III.3 – Gráfico gerado no medidor de parâmetros Miyachi MM-380A com parâmetros de 8,13*kA e 5cy*.

Esta fase inicial da dissertação permitiu através da calibração garantir exatidão dos valores medidos, tendo em vista a grande variação existente dos parâmetros de soldagem usados no processo de soldagem por resistência. Existe uma tendência na área automobilística de dar maior importância para os ajustes dos parâmetros, tendo em vista que isto permitirá vantagem econômica e de produção. Vários trabalhos mostram esta preocupação em ajustes mais precisos de parâmetros, principalmente a corrente, o tempo de soldagem e a força exercida entre os eletrodos.

AURES (2006) em sua dissertação utilizou um sistema de calibração, aquisição e monitoração de parâmetros de soldagem semelhante, constituído de um sistema computadorizado de aquisição e tratamento de dados, e de sensores de monitoração de corrente e tensão. O mesmo utilizou uma faixa de corrente de 1 a 6 *kA* e uma força de eletrodos de 2 a 6 *kN*, sendo empregados dois canais de entrada da placa A/D e um toróide utilizado para monitorar os valores de corrente, e para a calibração da força na pinça de soldagem foi utilizado um dinamômetro digital.

III.2. Análise de Otimização de parâmetros de soldagem.

Para cada tempo de solda, potência do transformador da máquina de solda e pressão entre os eletrodos foi gerado um gráfico relacionando o diâmetro da solda, medido através do ensaio de arrancamento e a corrente de soldagem medida utilizando equipamento adequado descrito no item II.2.3. Os principais parâmetros, que podem ser controlados em uma máquina de solda por resistência, são tempo de soldagem, a corrente de solda e a força do eletrodo. A habilidade de fazer soldas, com base nesses parâmetros, mantendo a produtividade, é auxiliada através de gráficos de soldabilidade. Estes gráficos definem os limites disponíveis para a produção de uma solda de qualidade (WILLIAMS e PARKER, 2004). A figura III.4 demonstra um exemplo de gráfico de soldabilidade utilizado no presente estudo. Parâmetros similares foram avaliados por SOUZA e COMITRA (2006), conforme tabela III.1, com direta aplicação na indústria automotiva, sendo encontrado comportamento semelhante no que se refere aos valores da geometria e do ponto de solda e a análise macrográfica avaliada.

Tabela III.1: Parâmetros de soldagens utilizados por SOUZA (2006).

Corrente de Solda (kA)	Tempo de Solda (Ciclos)	Força de Aperto (daN)
11	12	210
9,7	10	210
9	12	300
11	11	250
11	10	210
12	12	300
9,7	12	210
10	10	300
10	14	230

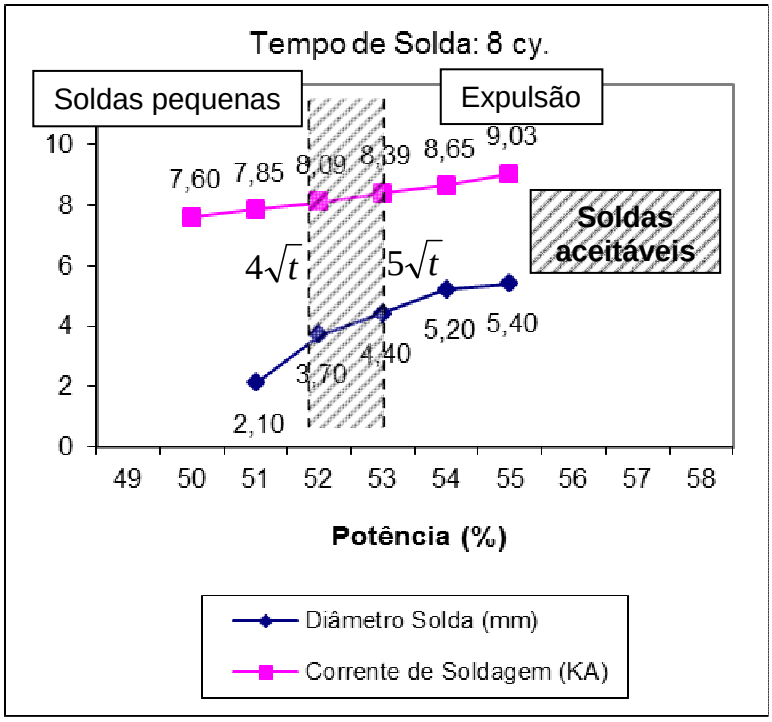


Figura III.4 – Gráfico esquematizado demonstrando soldas aceitáveis para uma soldagem com 8 ciclos (tempo) e 290*kgf* (força de eletrodos).

Na tabela III.2 são mostrados os valores das primeiras soldagens realizadas com os parâmetros adotados. Os gráficos nas figuras III.5 e III.6 foram gerados para auxiliar a escolha dos melhores parâmetros, seguindo critérios da curva de soldabilidade. Os círculos em negrito no interior dos gráficos delimitam as soldas aceitáveis, como melhor representado nas figuras III.5 e III.6.

Tabela III.2: Soldagens realizadas com primeiros parâmetros definidos.

Tempo de Soldagem (cy)	Potência de Solda (%)	Corrente RMS (kA)	Diâmetro Solda (mm)	Corrente RMS (kA)	Diâmetro Solda (mm)
6	49				
	50				
	51				
	52				
	53	8,1	2,8	8,1	
	54	8,4	3,8	8,3	
	55	8,6	4,2	8,6	
	56	9,0	4,6	9,0	2,6
	57	9,3	5,0	9,2	3,6
	58	9,6	5,2	9,5	4,5
7	49				
	50				
	51				
	52	7,3	4,7	7,8	2,6
	53	7,6	4,9	8,1	3,2
	54	7,9	5,1	8,3	4,3
	55	8,2	5,1	8,7	4,8
	56	8,4	5,2	8,9	5,0
	57	8,8	5,5	9,3	5,4
	58				
8	49				
	50	7,3	2,8	7,6	
	51	7,6	4,6	7,9	2,1
	52	7,8	5,0	8,1	3,7
	53	8,1	5,0	8,4	4,4
	54	8,4	5,2	8,7	5,2
	55	8,8	5,5	9,0	5,4
	56				
	57				
	58				
		Força 200 kgf		Força 290 kgf	

Tempo de Soldagem (cy)	Potência de Solda (%)	Corrente RMS (kA)	Diâmetro Solda (mm)	Corrente RMS (kA)	Diâmetro Solda (mm)
9	49				
	50	7,4			
	51	7,7	4,1	7,6	
	52	7,9	4,5	7,8	3,2
	53	8,2	5,0	8,2	4,4
	54	8,5	5,3	8,4	5,0
	55	8,8	5,4	8,8	5,2
	56			9,0	5,9
	57				
	58				
10	49	7,3			
	50	7,4	2,8		
	51	7,7	4,2	7,5	2,0
	52	7,9	4,9	7,8	3,2
	53	8,2	5,1	8,2	4,7
	54	8,5	5,3	8,5	5,1
	55			8,8	5,6
	56			9,1	6,1
	57				
	58				
11	49	7,3			
	50	7,4	3,1		
	51	7,7	4,3		
	52	7,9	4,8	7,8	2,1
	53	8,2	5,1	8,1	3,7
	54	8,5	5,4	8,5	4,7
	55			8,8	5,2
	56			9,0	6,2
	57				
	58				
		Força 200 kgf		Força 290 kgf	

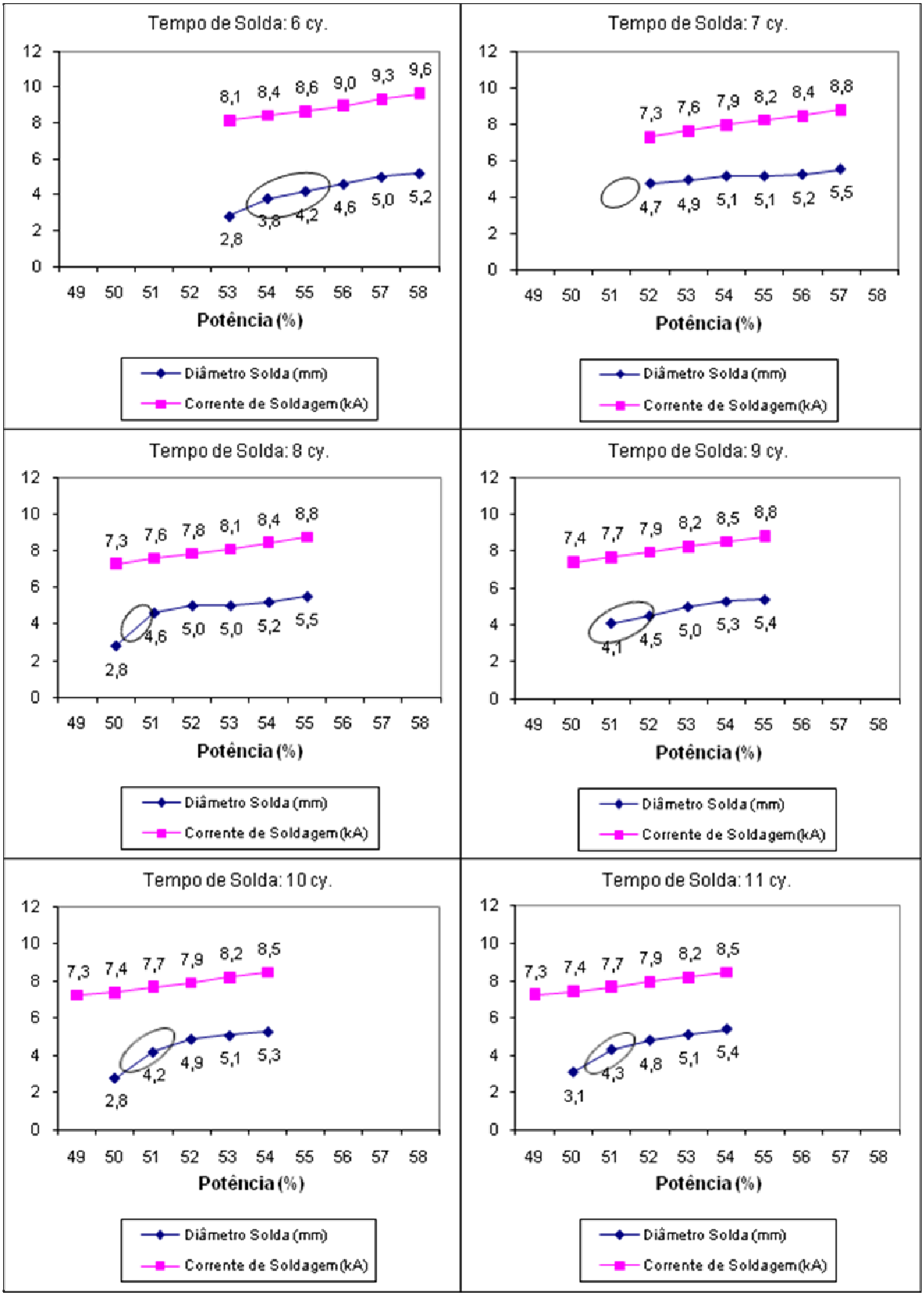


Figura III.5 – Gráficos gerados com força nos eletrodos de 200*kgf.*

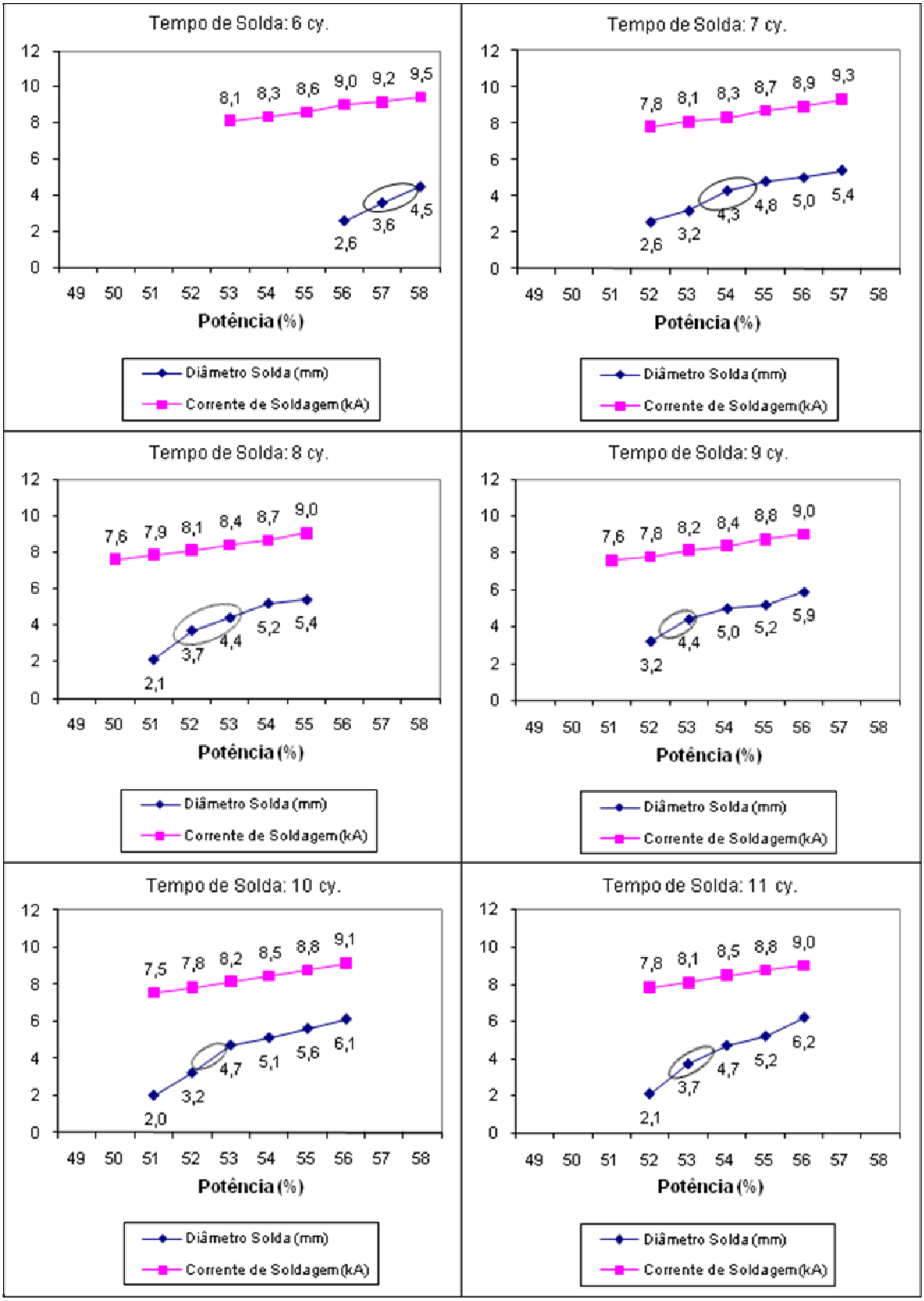


Figura III.6 – Gráficos gerados com força nos eletrodos de 290*kgf.*

Foi possível observar através dos gráficos gerados sensíveis aumentos da corrente de soldagem, em torno de 18%, promovido basicamente pelo aumento da potência do transformador da máquina de solda, e do diâmetro da solda, medido através do ensaio de arrancamento. Este comportamento da corrente de soldagem está de acordo com a literatura, como pode ficar evidenciado nos estudos de YI et al. (2009) que mostram, em aços galvanizados, o aumento da lente de solda em função da corrente de 7,5 a 11,5*kA*. GOODARZ et al. (2009) também mostram em seu trabalho, significativos aumentos da zona de fusão dos pontos de solda, próximos a 40% utilizando corrente de 10 a 12,5*kA* em chapas de aços galvanizados de baixo carbono de 1,1*mm*.

A partir do levantamento dos gráficos mostrados nas figuras III.5 e III.6 foram selecionados quatro conjuntos de parâmetros, seguindo critérios das curvas de soldabilidade. Os conjuntos de parâmetros selecionados foram:

- Força dos eletrodos de 200*kgf*. A escolha deste valor foi devido aos menores valores de corrente de soldagem encontrados, conforme pode ser verificado na tabela III.2;
- Tempo de soldagem de 8 ciclos (cy) com 52% da potência de soldagem. Optou-se pela seleção de um parâmetro fora do limite pré-estabelecido como forma de demonstrar como ocorre nas indústrias automobilísticas onde não existem estudos preliminares para otimização de parâmetros de soldagem;
- Tempo de soldagem de 9*cy* com 51% da potência de soldagem. Este e os próximos dois parâmetros foram selecionados dentro dos limites pré-estabelecidos e com menores valores de corrente de soldagem.
- Tempo de soldagem de 9*cy* com 52% da potência de soldagem e
- Tempo de soldagem de 10*cy* com 51% da potência de soldagem.

Com a escolha destas faixas ótimas de parâmetros foram realizadas soldagens até o desgaste das capas dos eletrodos e após considerável diminuição das forças medidas nos ensaios de tração e cisalhamento. A figura III.7 mostra o desgaste de uma das capas de eletrodos utilizadas. As soldas foram caracterizadas a cada 250 pontos de solda e novamente medidas as correntes de soldagem; os diâmetros dos pontos de soldas, ensaios de arrancamento, ensaios de tração axial e de cisalhamento. As tabelas III.3, III.4, III.5 e III.6 apresentam os valores das medições das faixas ótimas dos parâmetros selecionados.

Tabela III.3: Resultados para soldagem com 8cy e 52% de potência de solda.

Tempo e Potência Solda	Pontos de Solda	Ø de Solda *(mm)*	Corrente *(kA)*	Tração Axial *(kgf)*	Ensaio de Cisalhamento *(kgf)*	Tempo e Potência Solda	Pontos de Solda	Ø de Solda *(mm)*	Corrente *(kA)*	Tração Axial *(kgf)*	Ensaio de Cisalhamento *(kgf)*
8 cy 52%	0	4,2	7,7			**8 cy 52%**	750	0,0	7,8		
		3,9	7,8					0,0	7,8		
		3,6	7,8					0,0	7,8		
			7,7	264,4					7,8	113,4	
			7,7	235,7					7,8	116,0	
			7,7	259,7					7,8	73,5	
			7,8		293,8				7,7		260,9
			7,8		289,0				7,7		247,6
			7,8		303,0				7,7		254,3
	Média	**3,9**	**7,8**	**253,3**	**295,3**		Média	**0,0**	**7,8**	**101,0**	**254,3**
8 cy 52%	250	4,6	7,5			**8 cy 52%**	1000	0,0			
		4,9	7,5					0,0			
		4,5	7,5					0,0			
			7,5	257,1						43,1	
			7,6	264,6						24,6	
			7,6	270,4						34,2	
			7,5		312,6						261,5
			7,5		315,9						260,0
			7,5		310,7						240,3
	Média	**4,7**	**7,5**	**264,0**	**313,1**		Média	**0,0**		**34,0**	**253,9**
8 cy 52%	500	4,2	7,6								
		4,2	7,7								
		4,0	7,7								
			7,7	217,1							
			7,7	223,2							
			7,7	226,8							
			7,6		296,2						
			7,7		296,0						
			7,7		300,9						
	Média	**4,1**	**7,7**	**222,4**	**297,7**						

Tabela III.4: Resultados para soldagem com 9cy e 51% de potência de solda.

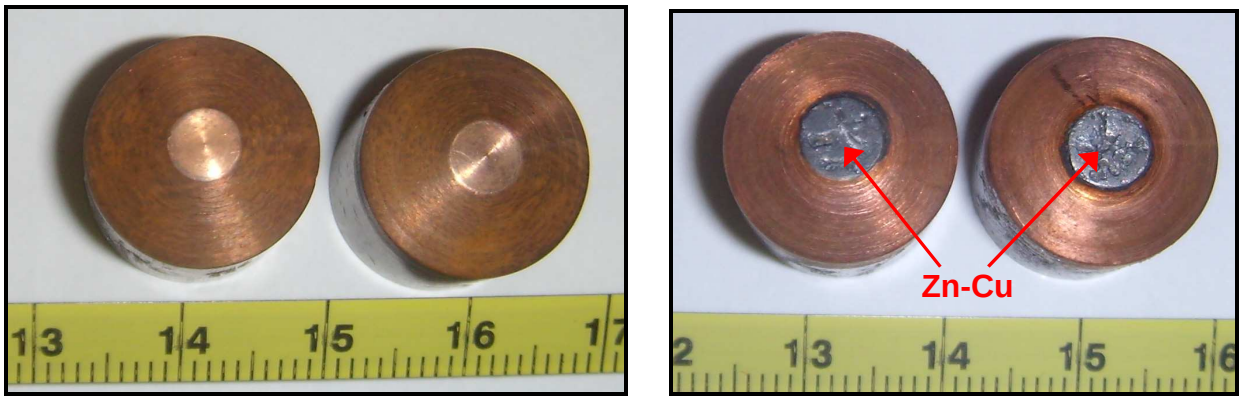
Tempo e Potência Solda	Pontos de Solda	Ø de Solda *(mm)*	Corrente *(kA)*	Tração Axial *(kgf)*	Ensaio de Cisalhamento *(kgf)*	Tempo e Potência Solda	Pontos de Solda	Ø de Solda *(mm)*	Corrente *(kA)*	Tração Axial *(kgf)*	Ensaio de Cisalhamento *(kgf)*
9 cy 51%	0	5,3	7,4			**9 cy 51%**	750	3,9	7,4		
		5,2	7,5					3,6	7,5		
		5,3	7,5					4,6	7,5		
			7,4	284,9					7,5	204,0	
			7,4	287,8					7,6	184,3	
			7,4	310,2					7,5	211,9	
			7,3		336,5				7,5		283,6
			7,3		337,4				7,5		289,0
			7,3		335,5				7,5		286,7
	Média	**5,3**	**7,4**	**294,3**	**336,5**		Média	**4,0**	**7,5**	**200,1**	**286,4**
9 cy 51%	250	5,2	7,4			**9 cy 51%**	1000	2,0	7,5		
		5,1	7,5					2,6	7,5		
		5,0	7,5					3,0	7,6		
			7,4	312,6					7,5	76,5	
			7,4	299,3					7,6	94,1	
			7,4	316,5					7,6	101,8	
			7,4		332,6				7,6		220,6
			7,4		329,9				7,6		247,4
			7,4		325,0				7,5		225,8
	Média	**5,1**	**7,4**	**309,5**	**329,2**		Média	**2,5**	**7,5**	**90,8**	**231,3**
9 cy 51%	500	4,2	7,5								
		4,2	7,6								
		4,3	7,5								
			7,5	222,4							
			7,5	228,7							
			7,5	212,1							
			7,5		306,2						
			7,5		296,7						
			7,5		306,5						
	Média	**4,2**	**7,5**	**221,1**	**303,1**						

Tabela III.5: Resultados para soldagem com 9cy e 52% de potência de solda.

Tempo e Potência Solda	Pontos de Solda	Ø de Solda *(mm)*	Corrente *(kA)*	Tração Axial *(kgf)*	Ensaio de Cisalhamento *(kgf)*	Tempo e Potência Solda	Pontos de Solda	Ø de Solda *(mm)*	Corrente *(kA)*	Tração Axial *(kgf)*	Ensaio de Cisalhamento *(kgf)*
9 cy 52%	0	4,9	7,9			**9 cy 52%**	1000	4,7	7,7		
		5,5	8,0					4,9	7,8		
		5,5	8,0					4,9	7,7		
			8,0	313,3					7,7	255,1	
			7,9	324,7					7,6	260,9	
			7,9	280,5					7,7	302,0	
			8,0		346,0				7,6		309,3
			7,9		347,7				7,7		324,1
			7,9		338,1				7,7		319,6
	Média	**5,3**	**7,9**	**306,2**	**343,9**		Média	**4,8**	**7,7**	**272,7**	**317,7**
9 cy 52%	250	5,5	7,7			**9 cy 52%**	1250	4,6	7,8		
		5,7	7,8					4,5	7,8		
		5,7	7,9					4,3	7,7		
			7,8	216,5					7,8	243,2	
			7,8	261,9					7,7	265,7	
			7,8	301,7					7,7	258,1	
			7,8		355,8				7,8		322,1
			7,8		348,4				7,9		318,9
			7,7		352,4				7,8		322,8
	Média	**5,6**	**7,8**	**260,0**	**352,2**		Média	**4,5**	**7,8**	**255,7**	**321,3**
9 cy 52%	500	5,5	7,8			**9 cy 52%**	1500	4,0	7,8		
		5,6	7,8					2,9	7,8		
		5,4	7,7					2,2	7,8		
			7,7	306,5					7,8	97,8	
			7,7	304,1					7,8	142,1	
			7,7	298,9					7,9	140,4	
			7,8		346,9				7,8		291,7
			7,8		345,3				7,9		290,4
			7,8		344,2				7,9		290,2
	Média	**5,5**	**7,8**	**303,2**	**345,5**		Média	**3,0**	**7,8**	**126,8**	**290,8**
9 cy 52%	750	5,7	7,8								
		5,2	7,8								
		5,2	7,8								
			7,8	277,7							
			7,7	282,8							
			7,7	274,2							
			7,8		323,6						
			7,8		320,5						
			7,7		316,0						
	Média	**5,4**	**7,8**	**278,2**	**320,0**						

Tabela III.6: Resultados para soldagem com 10cy e 51% de potência de solda.

Tempo e Potência Solda	Pontos de Solda	Ø de Solda *(mm)*	Corrente *(kA)*	Tração Axial *(kgf)*	Ensaio de Cisalhamento *(kgf)*	Tempo e Potência Solda	Pontos de Solda	Ø de Solda *(mm)*	Corrente *(kA)*	Tração Axial *(kgf)*	Ensaio de Cisalhamento *(kgf)*
10 cy 51%	0	5,2	7,4			**10 cy 51%**	1000	3,9	7,4		
		5,2	7,5					3,7	7,5		
		5,2	7,5					3,7	7,4		
			7,5	316,8					7,4	196,2	
			7,5	306,8					7,4	192,3	
			7,5	299,6					7,4	192,6	
			7,4		336,5				7,4		276,9
			7,3		337,9				7,4		270,1
			7,4		336,8				7,4		271,3
	Média	**5,2**	**7,4**	**307,7**	**337,1**		Média	**3,8**	**7,4**	**193,7**	**272,8**
10 cy 51%	250	4,9	7,3			**10 cy 51%**	1250	3,0	7,5		
		5,2	7,3					3,1	7,6		
		4,9	7,3					3,1	7,5		
			7,3	287,5					7,6	125,3	
			7,3	293,5					7,6	152,0	
			7,3	277,1					7,5	111,5	
			7,2		328,9				7,6		239,7
			7,2		323,4				7,5		257,3
			7,3		323,7				7,5		247,4
	Média	**5,0**	**7,3**	**286,0**	**325,3**		Média	**3,1**	**7,6**	**129,6**	**248,1**
10 cy 51%	500	4,7	7,3			**10 cy 51%**	1500	0,0	7,7		
		4,7	7,4					0,0	7,8		
		4,8	7,3					0,0	7,7		
			7,4	271,2					7,8	34,0	
			7,3	268,3					7,8	76,5	
			7,3	275,3					7,8	39,1	
			7,3		316,8				7,7		230,9
			7,3		321,2				7,7		238,5
			7,3		325,7				7,7		228,5
	Média	**4,7**	**7,3**	**271,6**	**321,2**		Média		**7,8**	**49,9**	**232,6**
10 cy 51%	750	4,3	7,4								
		4,3	7,5								
		4,0	7,3								
			7,4	206,2							
			7,4	316,7							
			7,3	220,7							
			7,3		293,5						
			7,4		280,1						
			7,4		288,5						
	Média	**4,2**	**7,4**	**247,9**	**287,4**						



(a) **(b)**

Figura III.7 – Capas de eletrodos antes das soldagens (a) e após a soldagem (b) aproximadamente 1000 pontos de solda utilizando parâmetros 8*cy* e 52%. Observar formação de liga Zn-Cu (Latão).

Durante o processo de soldagem por resistência, os eletrodos são submetidos a altas tensões compressivas e elevadas temperaturas. Nestas condições, o zinco do revestimento com temperatura de fusão mais baixa, reage com a capa de eletrodo, tendendo a formar latão (Zn+Cu). Além disso, freqüentemente ocorre a formação de crateras na face da capa de eletrodo, degradando a sua face de contato (INTERMACHINERY, 2003). Branco (2004) apresenta um estudo sobre a avaliação das capas de eletrodos em chapas galvanizadas automotivas onde podemos verificar semelhante desgaste e formação de crateras nas capas de eletrodos utilizadas, conforme observado na figura III.7.

A presença das crateras na face das capas dos eletrodos faz com que as chapas soldadas com estas capas passem a deixar marcas no ponto de solda, com o formato semelhante ao das crateras. Isto afeta também o acabamento do ponto, que passa a ter uma superfície irregular.

Observou-se neste estudo que a alteração dos parâmetros de soldagem sugeridos segundo a metodologia proposta afetou significativamente os atributos físicos da solda tais como, o tamanho do ponto de solda, o tamanho da lente de solda, a profundidade de impressão e a resistência mecânica das chapas soldadas. Dentre os principais parâmetros avaliados os que maior impactaram nos resultados foram a corrente e o tempo de soldagem. GOODARZ et al. (2009) em trabalho similar confirmaram a importância da seleção dos parâmetros de soldagem nos atributos físicos da solda como, tamanho da zona de fusão, impressão e penetração da solda utilizando os parâmetros de corrente e tempo de soldagem variando de 10 a 12,5*kA* e 9 a 14*cy* respectivamente em chapas de aço galvanizado de baixo carbono com 1,1*mm* de espessura e chegaram à conclusão de que realmente a escolha dos parâmetros de soldagem tem um impacto significativo na solda por resistência.

III.3. Ensaios Mecânicos.

III.3.1. Ensaio de arrancamento.

O ensaio de arrancamento foi largamente utilizado no presente estudo visando primeiramente uma análise qualitativa da solda. As medições dos diâmetros das soldas foram verificadas conforme informado no item II.3.3 e foram registrados nas tabelas III.3, III.4, III.5 e III.6. Os resultados indicam que para as condições de 8*cy* e 52% foram encontrados valores máximos de 4,9 e mínimo de 3,6; para 9*cy* e 51% valores máximos de 5,3 e mínimo de 2,0; para 9*cy* e 52% valores máximos de 5,6 e mínimo de 2,2 e para 10*cy* e 51% valores máximos de 5,2 e mínimo de 3,0. O ensaio de arrancamento se mostra versátil pela simplicidade, mas a avaliação do diâmetro nos dá um espalhamento significativo tendo em vista a variação das correntes de soldagem e dos números de pontos de solda utilizados. Diversos trabalhos avaliaram as juntas soldadas a ponto por resistência através deste ensaio. AURES (2006) utilizou este tipo de ensaio em seus experimentos para avaliação das soldas acrescidos de estudos estatísticos e obteve resultados onde o Planejamento Robusto (Taguchi) determinou que somente o Tempo de corrente (Tcor) foi estatisticamente significativo e teve um efeito negativo, ou seja, quanto maior o valor de Tcor, menor a resposta (impressão), verificado em chapas galvanizadas de 1,2 e 4*mm*. As figuras III.12 e III.13 mostram, respectivamente, o ensaio de arrancamento e corpos de prova após este ensaio utilizados no presente estudo.



Figura III.12 – Ensaio de arrancamento.

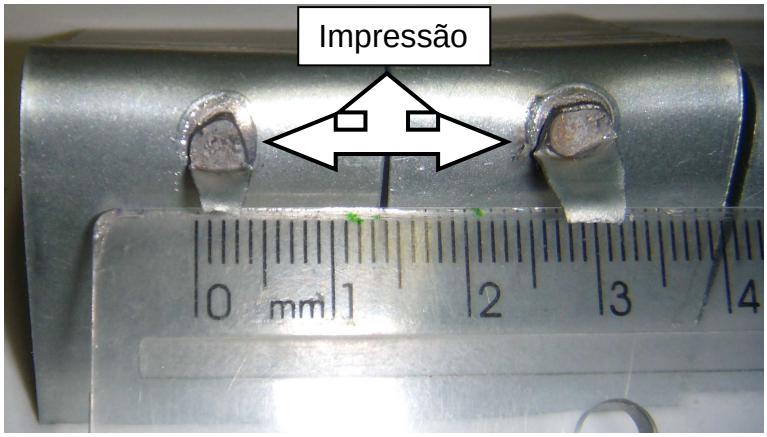


Figura III.13 – Corpos de prova após o ensaio de arrancamento com parâmetros de 9*cy*, 52% e 1250 pontos de solda.

O ensaio de arrancamento é também utilizado para a verificação quase que imediata da eficiência do ponto de solda de forma qualitativa. BRANCO (2004) utilizou esse este ensaio para verificação da integridade da solda onde se verificou que de acordo com os números de solda, de 100 a 1100 pontos, o diâmetro variou de 5,1 a 1,5*mm* em chapas de aço galvanizadas de 0,67*mm* de espessura.

Serão apresentados a seguir gráficos relacionando a corrente e os diâmetros de solda gerados a partir das tabelas III.2, III.3, III.4 e III.5.

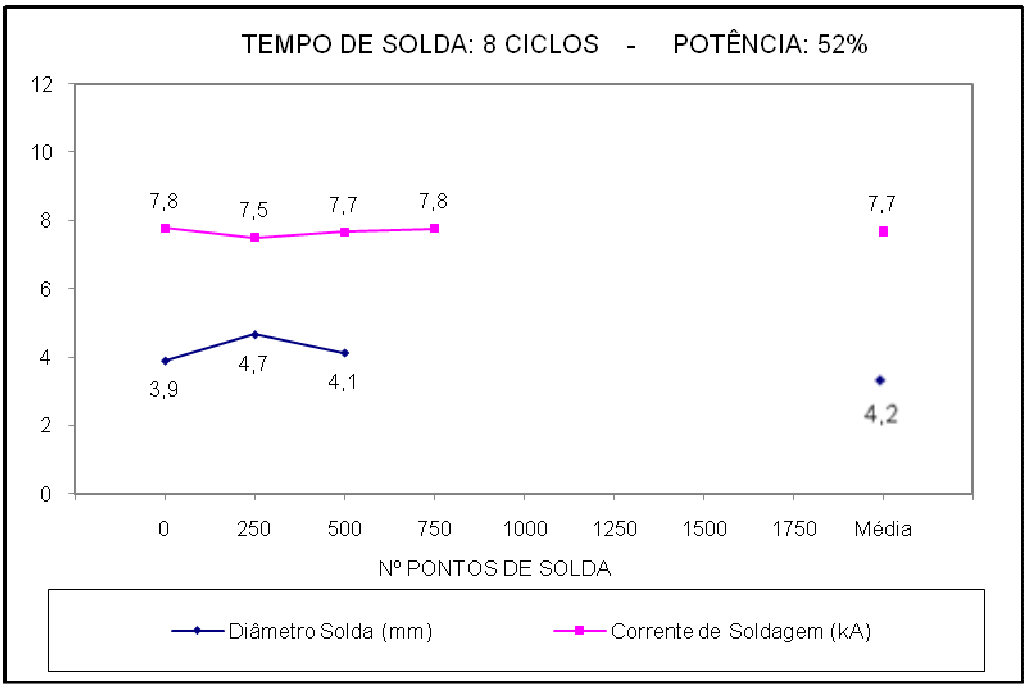


Figura III.14 – Corrente e diâmetros de solda dos parâmetros 8*cy* e 52%.

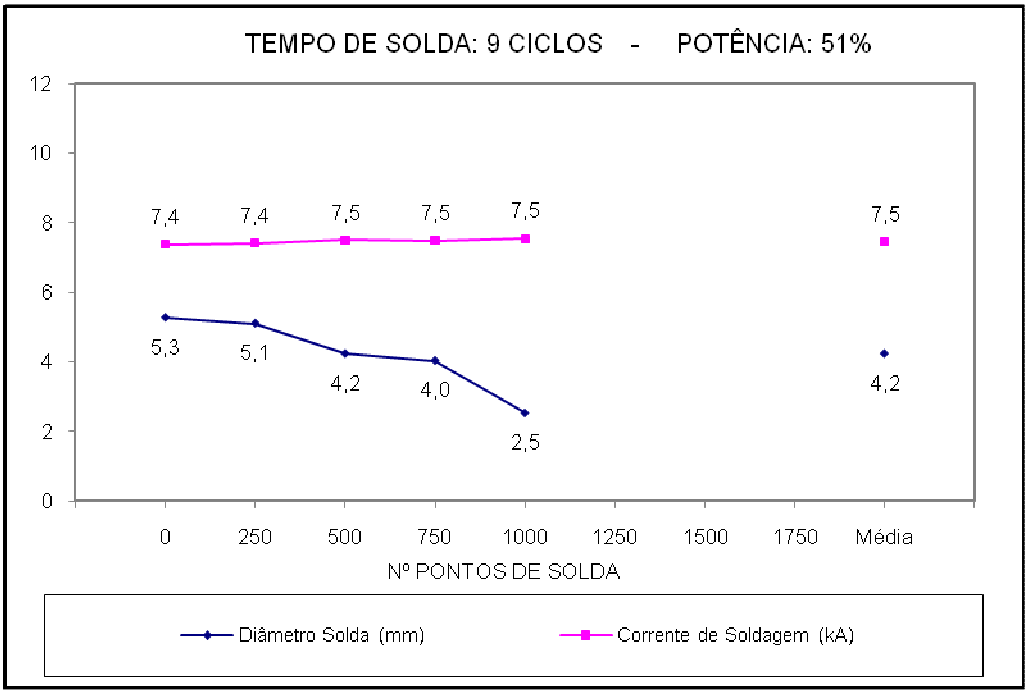


Figura III.15 – Corrente e diâmetros de solda dos parâmetros 9*cy* e 51%.

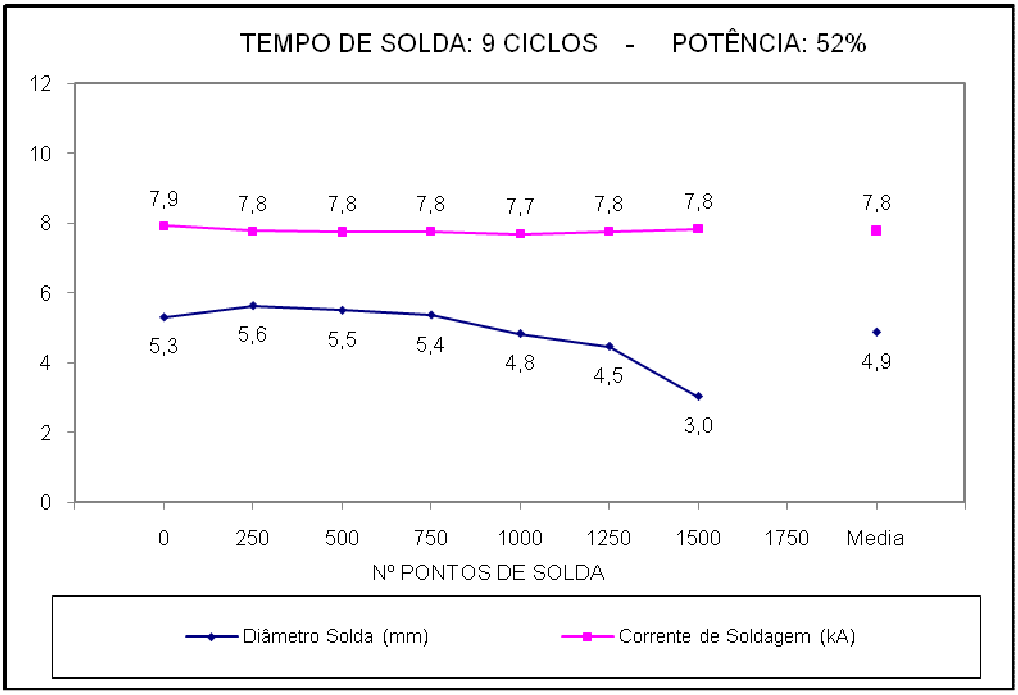


Figura III.16 – Corrente e diâmetros de solda dos parâmetros 9*cy* e 52%.

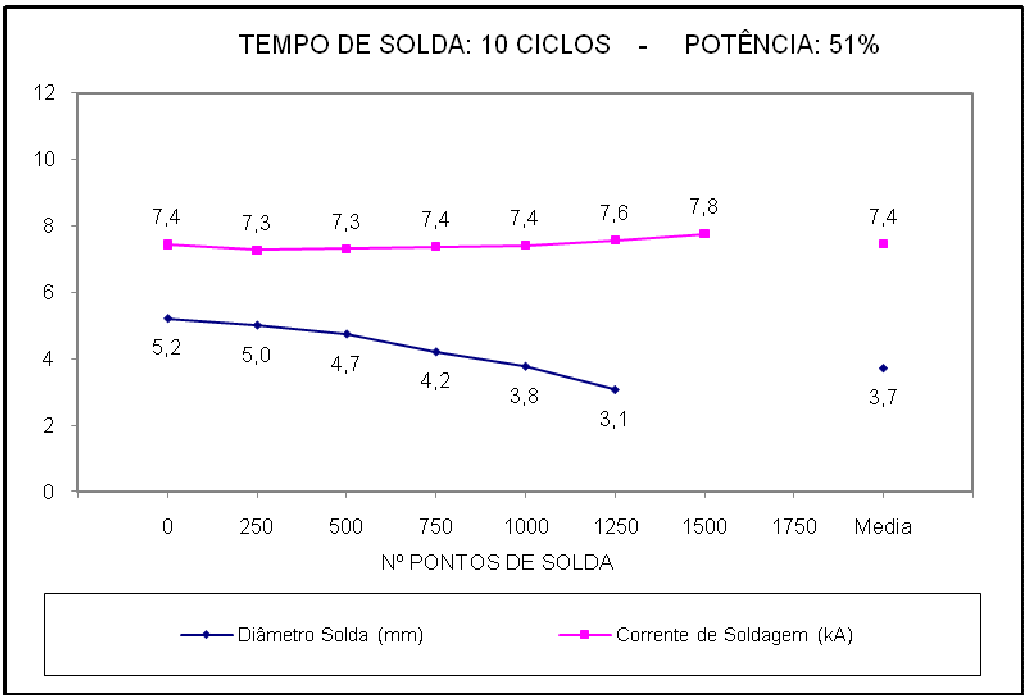


Figura III.17 – Corrente e diâmetros de solda dos parâmetros 10*cy* e 51%.

Pode-se observar, segundo os gráficos acima expostos, que em todos os quatro conjuntos de parâmetros houve uma diminuição do diâmetro das soldas ao longo das soldagens devido ao desgaste nos eletrodos, enquanto que a corrente de soldagem apresentou suaves variações ao longo das soldagens. CHAN (2005) em seu estudo demonstrou esta diminuição do diâmetro de solda devido, principalmente, ao desgaste das capas de eletrodos de acordo com números de pontos de solda em chapas de aço galvanizado de alta resistência e baixa liga com 0,7*mm* de espessura utilizando parâmetros de soldagem, corrente e tempo de soldagem, de 8,5*kA* e 11*cy*; força de soldagem de 2*kN*; taxa de soldagem de 20 soldas/min e tempo de espera de 5*cy*.

A metodologia proposta para avaliação dos pontos de solda no presente estudo obteve as seguintes vantagens: Utilizar baixar correntes de soldagem, minimizando custos em escala industrial; simplicidade na execução dos ensaios mecânicos; verificação do comportamento microestrutural da junta soldada; facilidade de aplicação desta metodologia em trabalhos futuros mediante utilização de outros parâmetros de soldagem. A principal limitação verificada desta metodologia é sua aplicação em indústrias que utilizam este tipo de soldagem em larga escala, pois há necessidade de dispender tempo para realização de tais estudos e a necessidade de tratamento estatístico devido à grande variedade de dados de entrada e de saída.

III.3.2. Ensaio de cisalhamento.

O ensaio de cisalhamento em soldagem a ponto por resistência é um dos principais ensaios para verificação do nível de resistência da solda. A Norma AWS D8.9-97 recomenda este ensaio para a avaliação das chapas metálicas com aplicação na indústria automotiva.

Os resultados indicados nas tabelas III.3, III.4, III.5 e III.6 e nas figuras III.27, III.28, III.29 e III.30 apontam para uma correlação entre os valores de resistência obtidos no ensaio de cisalhamento, entre os parâmetros ótimos selecionados, na faixa de 300*kgf*. Os maiores valores encontrados foram para condição que utilizou parâmetros de 9*cy* e 52%. Nota-se que este tipo de avaliação é bastante utilizado, mas possui limitações como baixa sensibilidade à verificação quando do desgaste do eletrodo.

Os aspectos dos corpos de prova após o ensaio de cisalhamento mostram que o rompimento se sucede na chapa, quando ocorre soldagem, como pode ser observado na figura III. 21. Observar que em algumas condições não houve cisalhamento devido a não formação da lente na interface das chapas. Nas tabelas III.3, III.4, III.5 e III.6 nota-se que o comportamento está relacionado diretamente com o aumento dos números de pontos de solda.

Os tipos de modos de falha existentes para o ensaio de cisalhamento, em testes estáticos, foram estudados por ZHOU et al. (1999) e NAKANO (2005) e são ilustrados nas figuras III.18 e Ill.19. O modo de falha na figura III.18 é indesejável do ponto de vista do desempenho do ponto de solda, pois simula o modo de falha do metal base, cuja curva pode ser obtida em ensaio de tração comum. Estes tipos de falha são também indesejáveis pois não permitem obter um valor quantitativo da resistência da junta soldada. Os modos de falha observados na figura III.19 são os que ocorrem por destacamento do ponto, rasgamento do metal base em torno do ponto de solda, na região da ZTA, e cisalhamento ou falha na interface, também na ZTA. Nestes três casos a qualidade do ponto de solda pode ser verificada, sendo estes modos indicativos da característica da solda. Nesta dissertação as falhas verificadas foram por destacamento, rasgamento e cisalhamento conforme mostrado nas figuras III.20 e III.21.

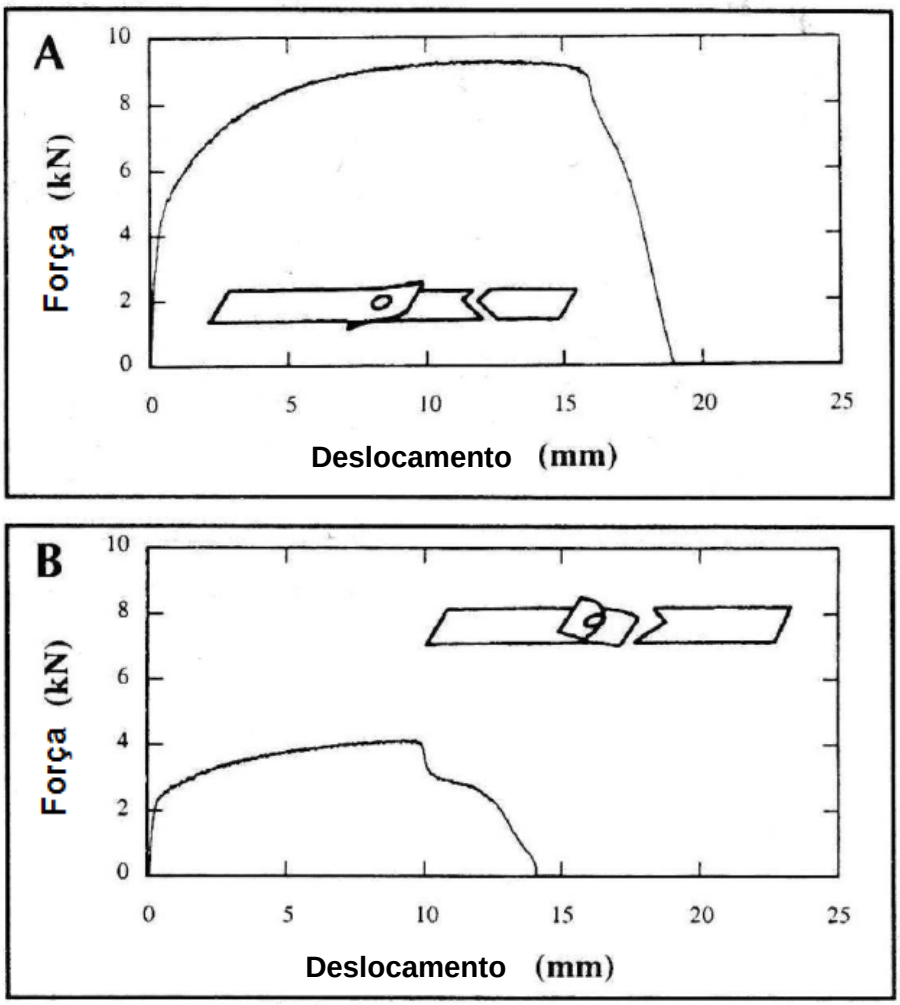


Figura III.18 – Curva força versus deslocamento (ZHOU et al., 1999 - Modificado).

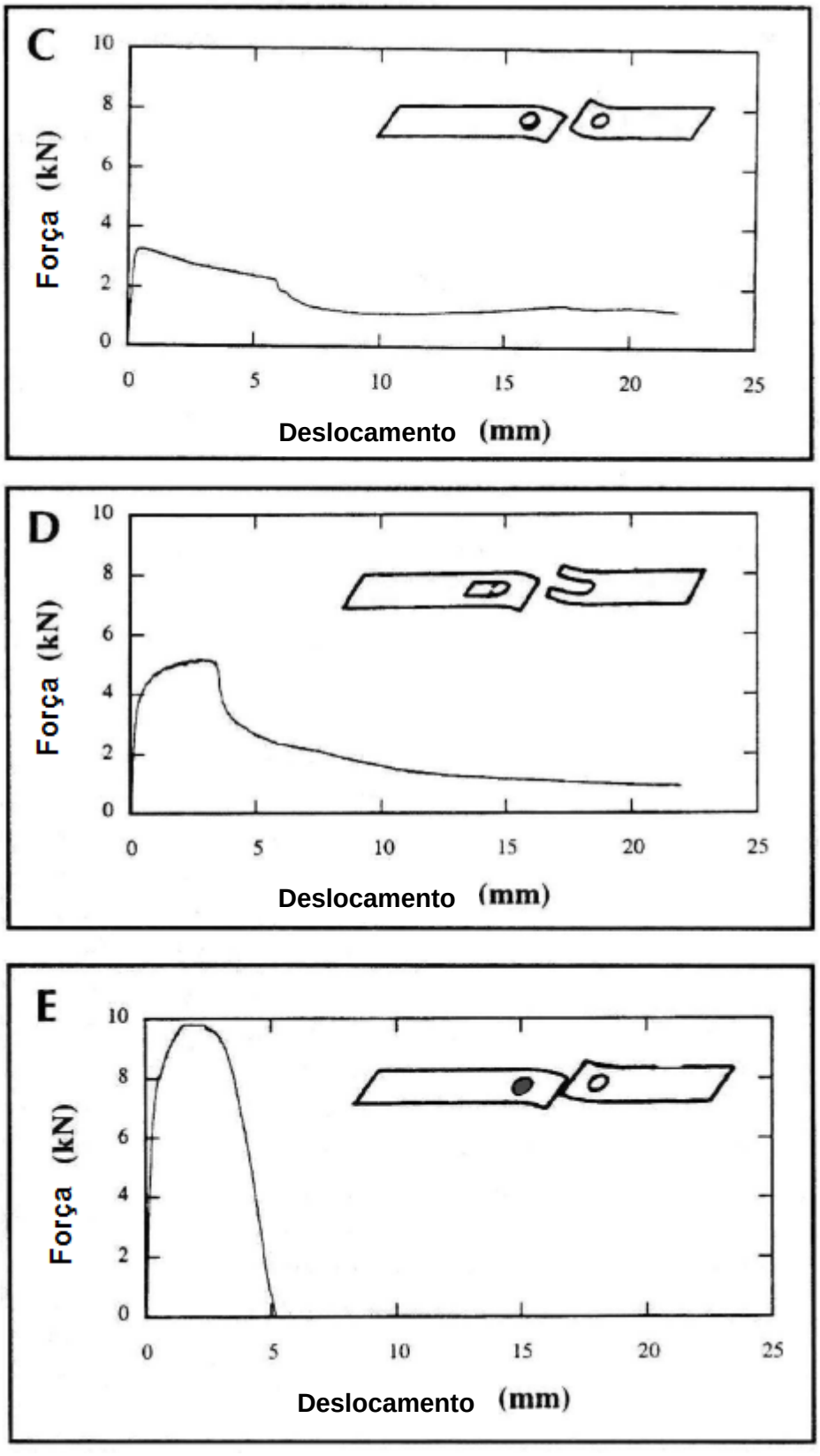


Figura III.19 – Curva força versus deslocamento (ZHOU et al., 1999 - Modificado) (continuação da figura III.18). Item ***C*** representa destacamento, ***D*** rasgamento e ***E*** cisalhamento.

GOODARZ et al. (2009) verificaram em seu trabalho que a falha gerada por cisalhamento ocorre devido à deformação plástica nas proximidades da lente de solda, sendo o tamanho da zona fundida o mais importante parâmetro para a distribuição das tensões durante o ensaio. POURANVARI et al. (2008) indicaram um modelo analítico para prever o tamanho da lente de solda mínima necessária para garantir o modo de falha de arrancamento durante o ensaio de cisalhamento e verificaram o aumento da absorção de energia conforme aumento da lente de solda até a expulsão do metal de solda.

Diversos autores, que pesquisam sobre soldagem a ponto por resistência, vêm utilizando este tipo de ensaio em seus estudos. VURAL (2004) compara o ensaio de cisalhamento com o diâmetro da lente de solda em chapas de aços IF galvanizadas e chapas de aço inox austenítico. LIN et al. (2006) e RADAKOVIC (2008) utilizaram o ensaio de cisalhamento como meio para verificação da propagação da fratura em corpos de prova soldados por resistência. GOMES (2007) utiliza o ensaio de cisalhamento para qualificação das soldagens por resistência e MUKHOPADHYAY et al. (2009) utilizaram este ensaio em aços IF para medição do nível de resistência das soldas.

Estudos como KONG et al.(2008), RADAKOVIC (2008), NIELSEN (2008) e ROSSI (2007) comprovam a eficácia do ensaio através de análises numéricas por elementos finitos.

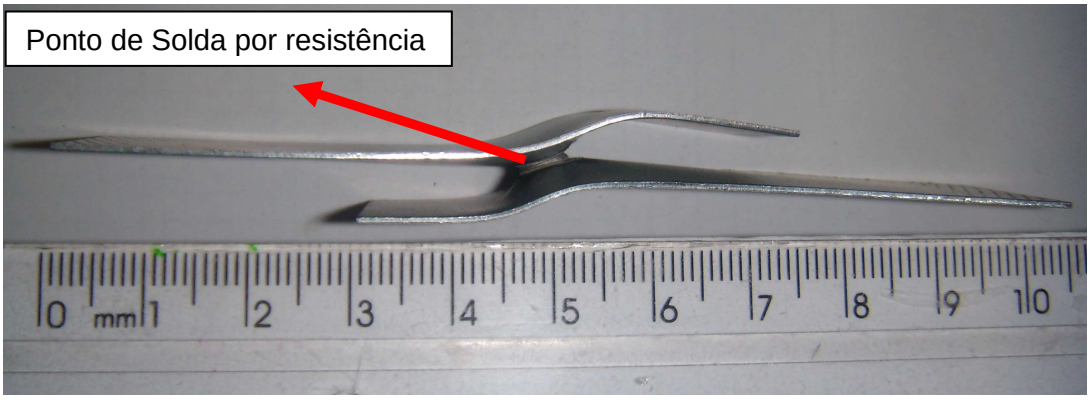


Figura III.20 – Corpo de prova após o ensaio de Cisalhamento utilizando parâmetros de soldagem de 9*cy* e 52%.

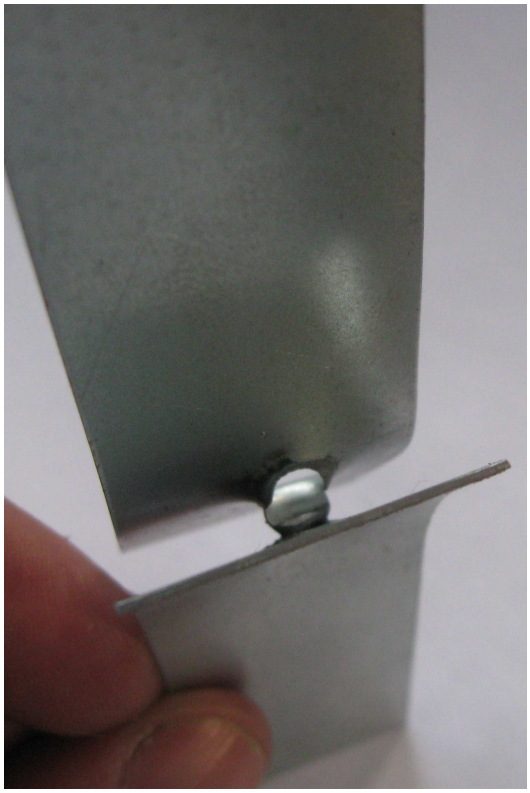


Figura III.21 – Corpo de prova após o ensaio de Cisalhamento utilizando parâmetros de soldagem de 9*cy* e 52%. Fratura por rasgamento.

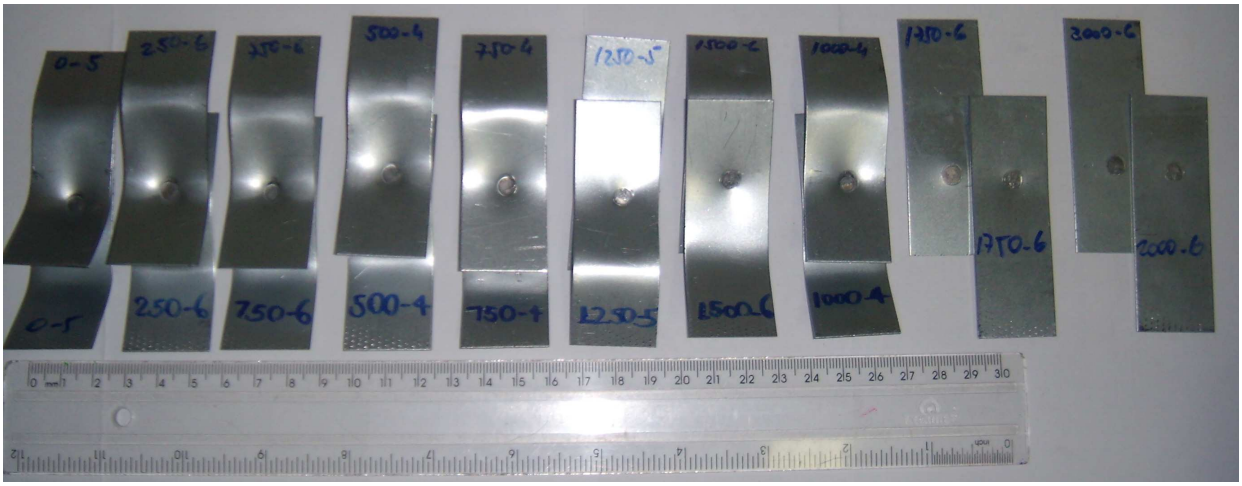


Figura III.22 – Corpos de prova após o ensaio de Cisalhamento. Parâmetros 9*cy* e 52% no início das soldagens até 2000 pontos de solda (esquerda para direita).

III.3.3. Ensaio de tração axial.

O ensaio de tração axial é também recomendando pela Norma AWS D8.9-97.

Os resultados indicados nas tabelas III.3, III.4, III.5 e III.6 e nas figuras III.27, III.28, III.29 e III.30 apontam para uma correlação entre os valores de resistência obtidos no ensaio

de tração, entre os parâmetros ótimos selecionados, na faixa de 250*kgf*. Os maiores valores encontrados foram para condição que utilizou parâmetros de 9*cy* e 52%. Nota-se que este tipo de avaliação apresentou-se com boa sensibilidade à verificação quando do desgaste do eletrodo.

TUMULURU (2006) utilizou este ensaio para verificação da qualidade das soldas a pontos por resistência em aços de alta resistência e aços “dual-phase” e verificou que no ensaio de tração o mecanismo de fratura se dá por cisalhamento devido à menor resistência do aço ao cisalhamento que por tração. Por isso a resistência à tração transversal da solda tende a ser inferior à sua força de tensão de cisalhamento. Este resultado está de acordo com o que foi encontrado no presente trabalho. Este ensaio mostrou-se vantajoso pelo fato de garantir valores de resistência da solda condizentes com a quantidade de soldas realizadas.

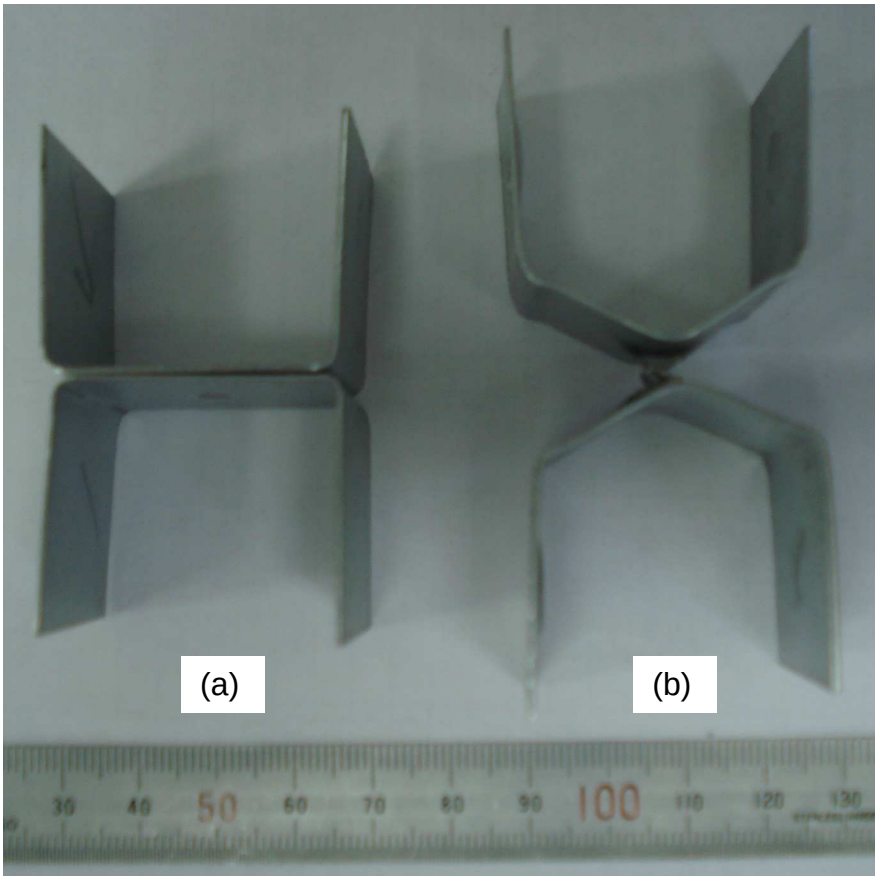
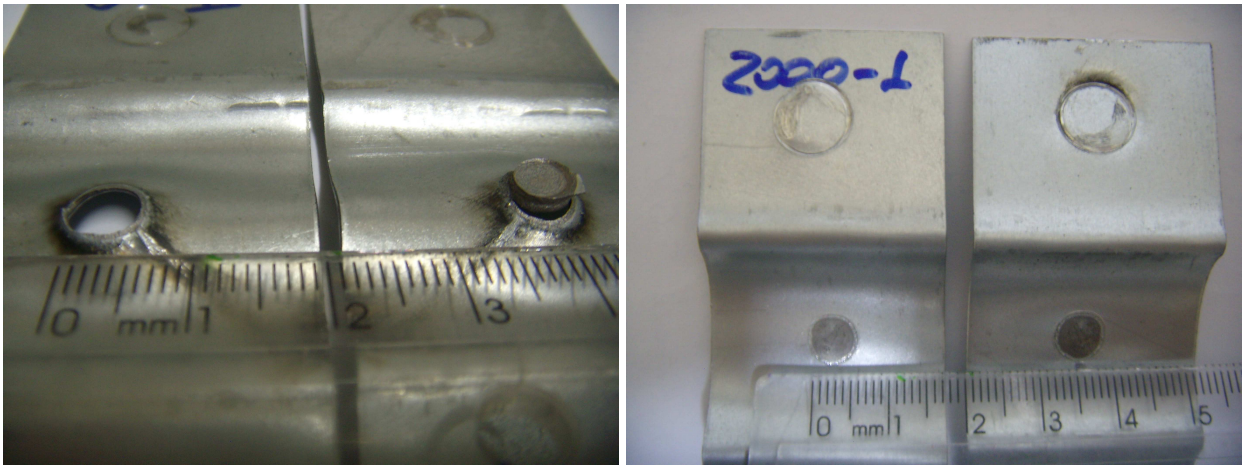


Figura III.23 – Corpo de prova para ensaio de tração axial antes (a) e após o ensaio (b). Para a condição com parâmetros de 9*cy* e 52%.

A figura III.23 mostra exemplo de corpo de prova para ensaio de tração axial conforme informado no item II.3.2. A figura III.24 mostra o comportamento dos corpos de prova após o ensaio de tração axial com fraturas distintas, sendo uma fratura por cisalhamento na

figura III.24 (a) fratura por destacamento na figura III.24 (b), demonstrando a não formação da lente de solda nesta fratura. Verifica-se que a lente de solda permanece íntegra durante o início das soldagens e vai se tornando menos resistente após a realização de muitos pontos de solda o que pode ser explicado pela degradação das capas de eletrodos.



(a) **(b)**

Figura III.24 – Detalhe do ponto de solda após o ensaio de Tração axial. Parâmetros 9*cy* e 52% no início das soldagens (a) e 9*cy* e 52% após 2000 pontos de solda. Fratura em (a) por cisalhamento e em (b) por destacamento.

III.3.4. Comparação entre ensaios.

O presente estudo mostrou que o ensaio de tração axial, apesar de registrar menores valores de resistência apresenta uma melhor sensibilidade nas soldagens próximas ao limite do desgaste do eletrodo, quando comparado com o ensaio de cisalhamento. Estudo realizado em aços IF por MUKHOPADHYAY et al. (2009) mostraram correlação semelhante ao presente estudo pois evidenciaram que os valores de força obtidos no ensaio de tração foram menores que nos ensaios de cisalhamento. Esta diferença se deve pelo fato de que apesar dos carregamentos sejam dirigidos por tração nos ensaios de tração axial e por cisalhamento nos ensaios de cisalhamento, a região da falha é conduzida pelas tensões de cisalhamento nos ensaios de tração axial e tensões trativas nos ensaios de cisalhamento.

(GOODARZ et al., 2009) através das figuras III.25 e III.26 revelam a localização da falha obtidos por análise macrográfica após secção no ponto de solda por resistência em ensaio de tração e ensaio de cisalhamento respectivamente.

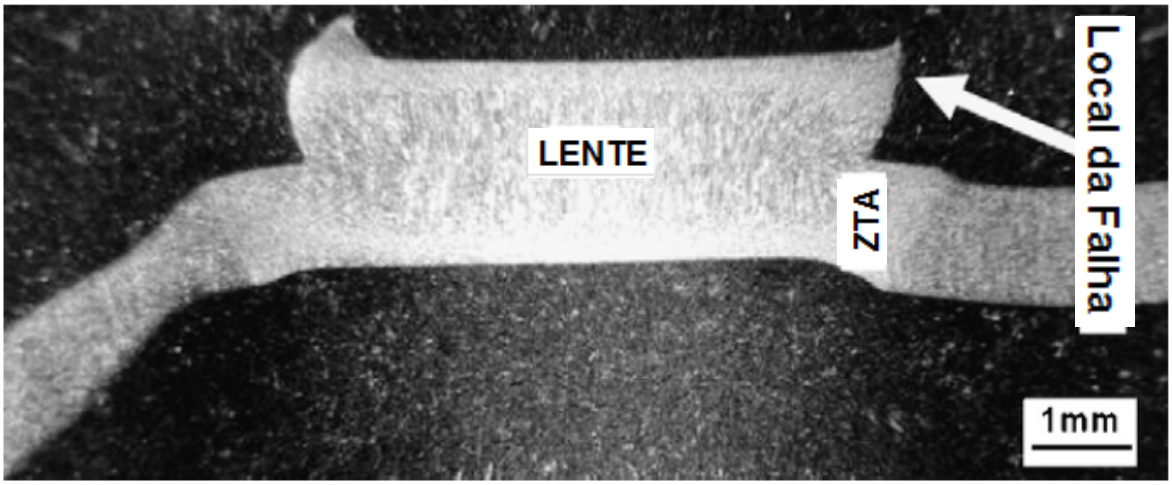


Figura III.25 – Macrografia da superfície da seção transversal de um ponto de solda com falha por cisalhamento em ensaios de tração (GOODARZ et al., 2009 - Modificado).

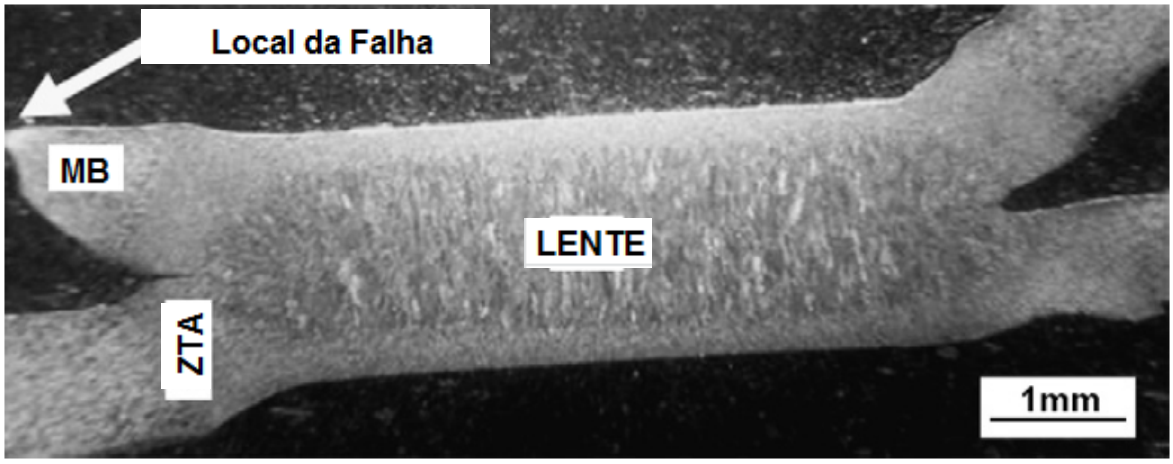


Figura III.26 – Macrografia da superfície da seção transversal de um ponto de solda com falha por cisalhamento em ensaios de cisalhamento (GOODARZ et al., 2009 - Modificado).

As figuras III.27, III.28, III.29 e III.30 mostram os resultados obtidos nas soldagens com os parâmetros ótimos selecionados conforme definido no item III.2. indicados nas tabelas III.3, III.4, III.5 e III.6.

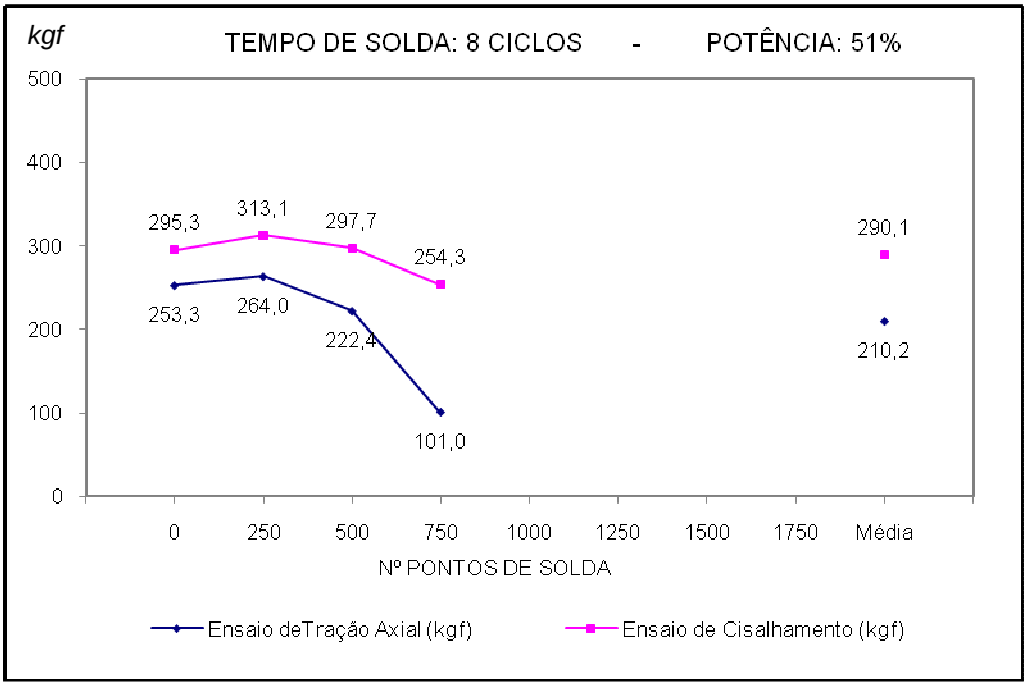


Figura III.27 – Comparação entre ensaios em CP com parâmetros 8*cy* e 52%.

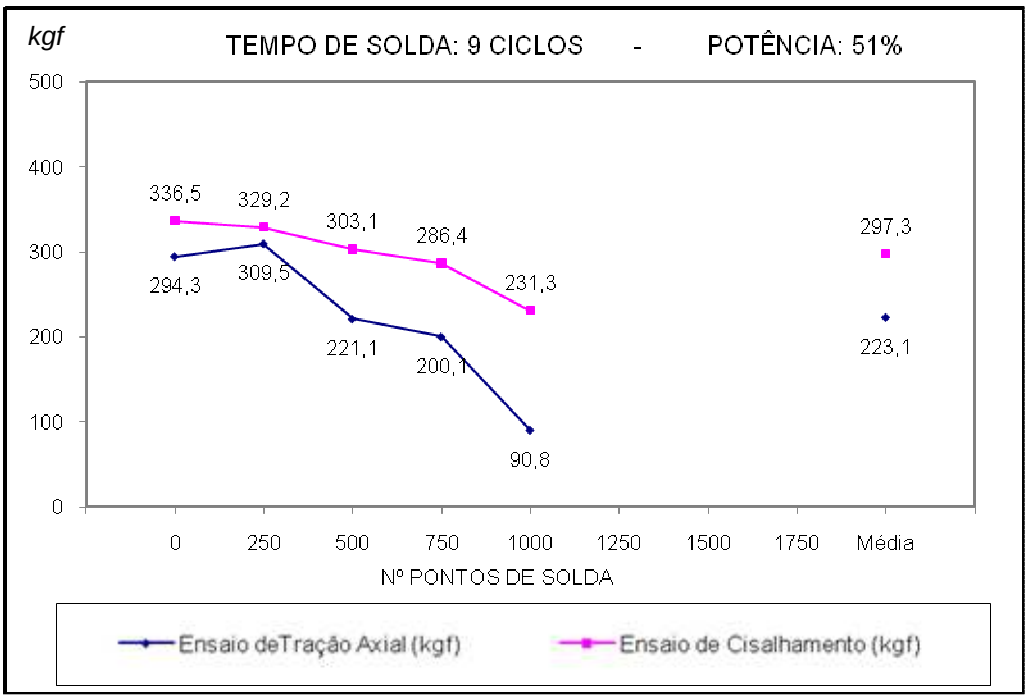


Figura III.28 – Comparação entre ensaios em CP com parâmetros 9*cy* e 51%.

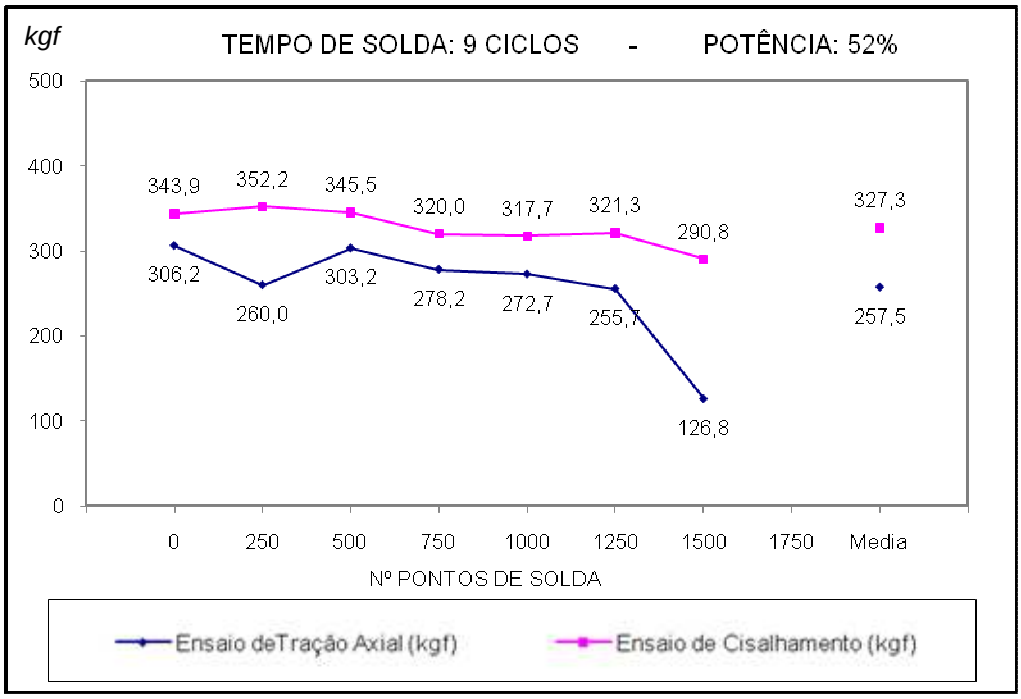


Figura III.29 – Comparação entre ensaios em CP com parâmetros 9*cy* e 52%.

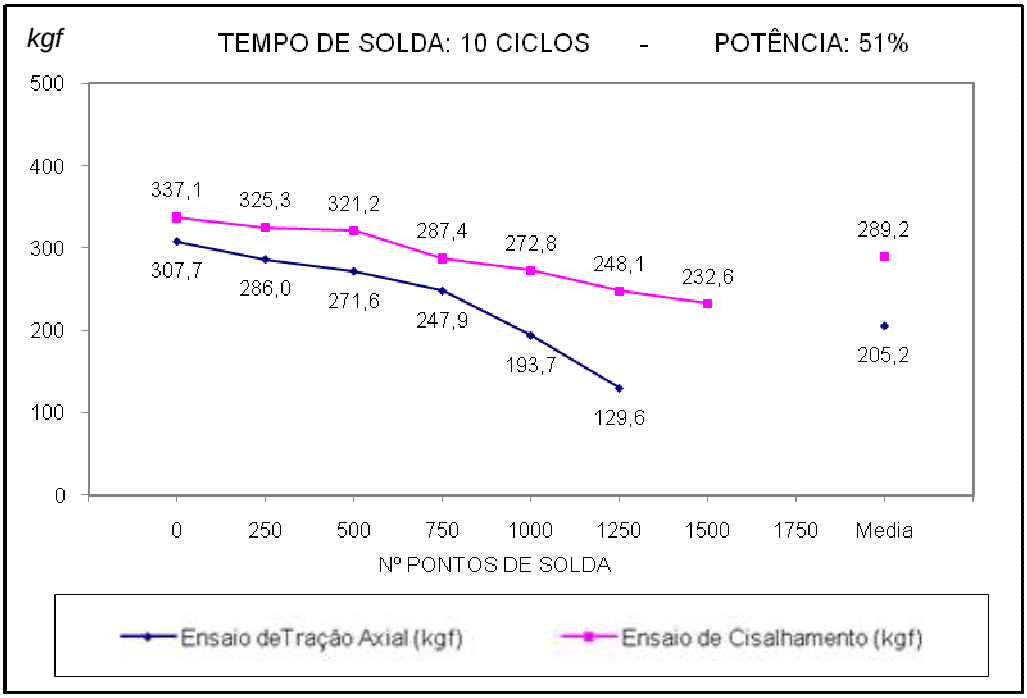


Figura III.30 – Comparação entre ensaios em CP com parâmetros 10*cy* e 51%.

III.4. Microdureza Vickers.

Na figura III.31 são observados os valores de microdureza encontrados para os quatro parâmetros de soldagem selecionados e no início de realização das soldagens. Observou-se que a dureza na região da lente foi próxima aos 180HV e no metal base foi da ordem de 100HV, valor este muito semelhante ao encontrado por MUKHOPADHYAY (2010) em aços IF (composição química 0,003%C; 0,4Mn; 0,007S; 0,015Si; 0,036Al; 0,033Cr; 0,012Ni; 0,04Ti; 0,0035%N). Verificou-se que os valores de dureza para os parâmetros selecionados foram próximos, havendo pouca influência da corrente e do tempo de soldagem, conforme HAYAT (2009) informara em seu estudo em soldagem por resistência em aços IF. Os valores de dureza obtidos na lente estão diretamente ligados a resistência da junta soldada obtida por solda por resistência CHAKRABORTY et al. (2011) e GOODARZ et al. (2009) correlacionaram estas propriedades.

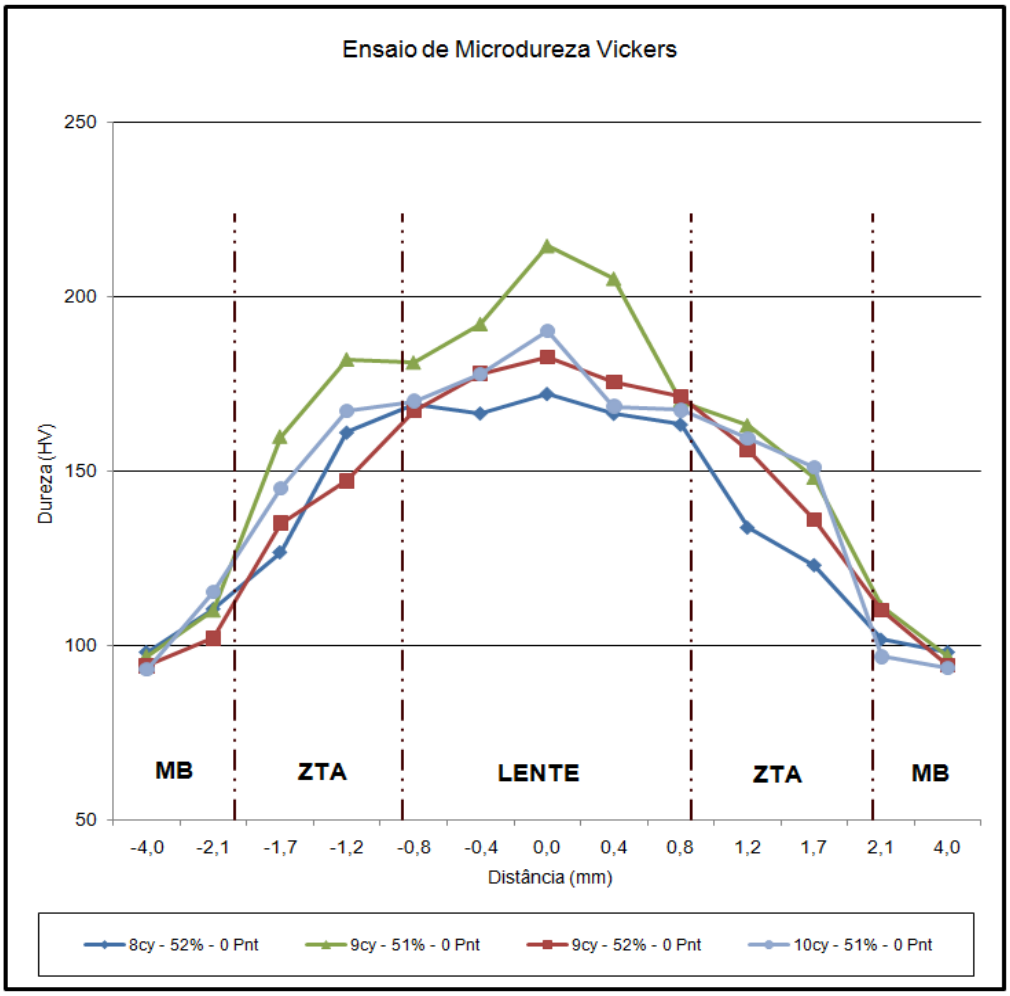


Figura III.31 – Dureza através de várias zonas do ponto de solda nas soldagens para as condições com parâmetros 8*cy* e 52%; 9*cy* e 51%; 9*cy* e 52%; 10*cy* e 51%. Com o eletrodo no início de seu uso.

Verificou-se que a dureza dos quatro parâmetros de soldagem selecionados ao final da vida útil do eletrodo foi menor na região da lente. A figura III.32 mostra o gráfico com estes valores encontrados.

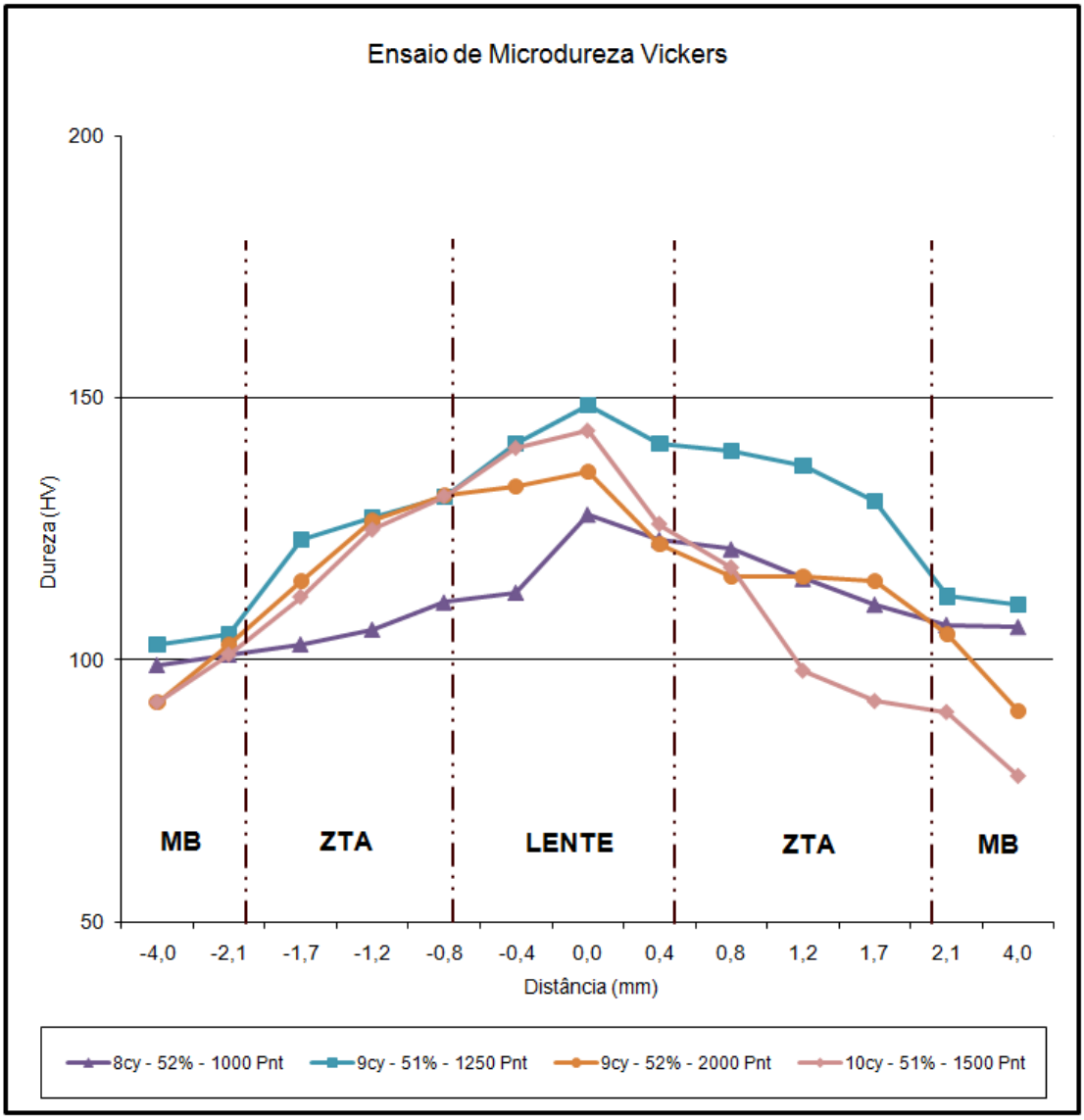


Figura III.32 – Dureza através de várias zonas do ponto de solda nas soldagens para as condições com parâmetros 8*cy* e 52%; 9*cy* e 51%; 9*cy* e 52%; 10*cy* e 51%. Com o eletrodo no final de sua vida útil.

GOULD et al. (2006) obtiveram os mesmos perfis de dureza encontrando valores maiores na lente em estudo de juntas soldadas por resistência usando aços IF com 0,8*mm* de espessura, a figura III.33 mostra o perfil de dureza encontrado que acresce do metal base para a direção do centro da lente de solda e correlacionam os níveis de dureza com as taxas de esfriamento que ocorrem devido a presença de martensita na zona de fusão.

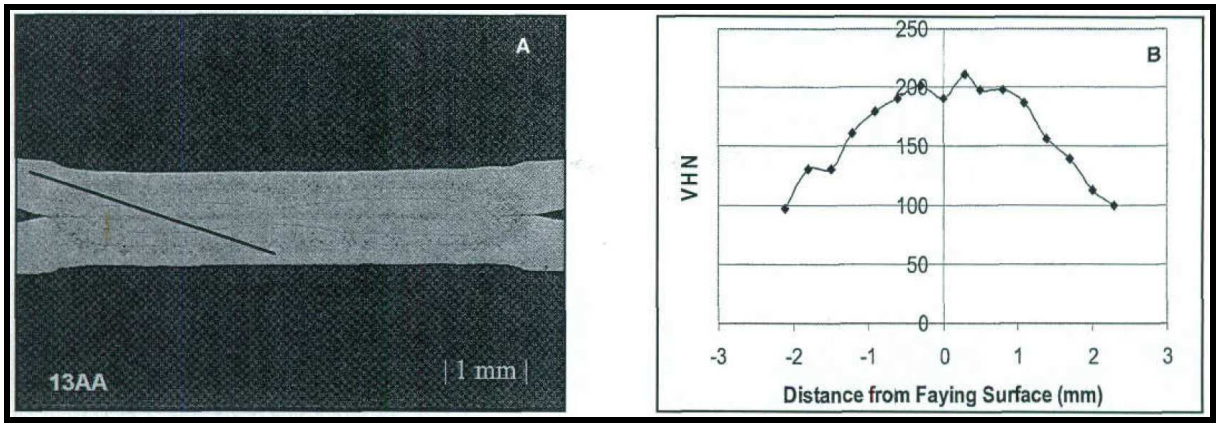


Figura III.33 – Micrografia com ensaio de dureza (esquerda) e gráfico com valores de dureza (direita) em solda a ponto por resistência em chapas de aço IF (GOULD et al., 2006).

GOODARZ et al. (2009) alcançaram níveis de dureza semelhantes em chapas de aço de baixo carbono com 1,1*mm* de espessura variando os parâmetros de soldagem de corrente e tempo de soldagem, conforme é mostrado na figura III.34. A dureza na lente da solda é cerca de 2,4 vezes o valor da dureza no metal base, devido à formação de martensita na região da lente se solda. Foi notado também que as pequenas variações na zona de fusão são devidas às taxas de esfriamento que não são constantes nesta região e que as variações de dureza na ZTA são quase lineares e possuem grandes variações que são devidas aos gradientes térmicos dos ciclos de soldagem.

POURANVARI et al. (2008) também mostrou níveis de dureza parecidos em chapas de aço de baixo carbono com 0,8*mm* de espessura, verificando a presença de martensita na região da zona fundida. A figura III.35 mostra as variações de dureza ao longo da microestrutura.

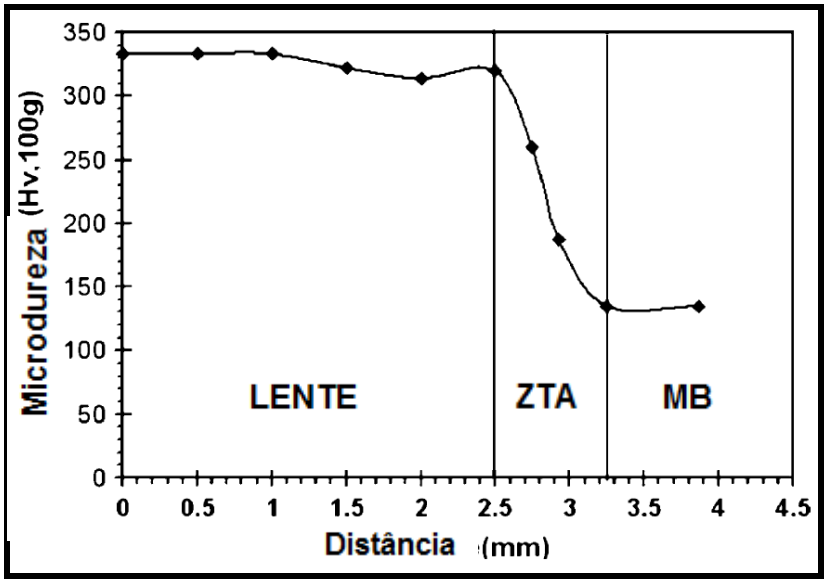


Figura III.34 – Gráfico com valores de dureza em solda a ponto por resistência em chapas de aço galvanizado baixo carbono (GOODARZ et al., 2009).

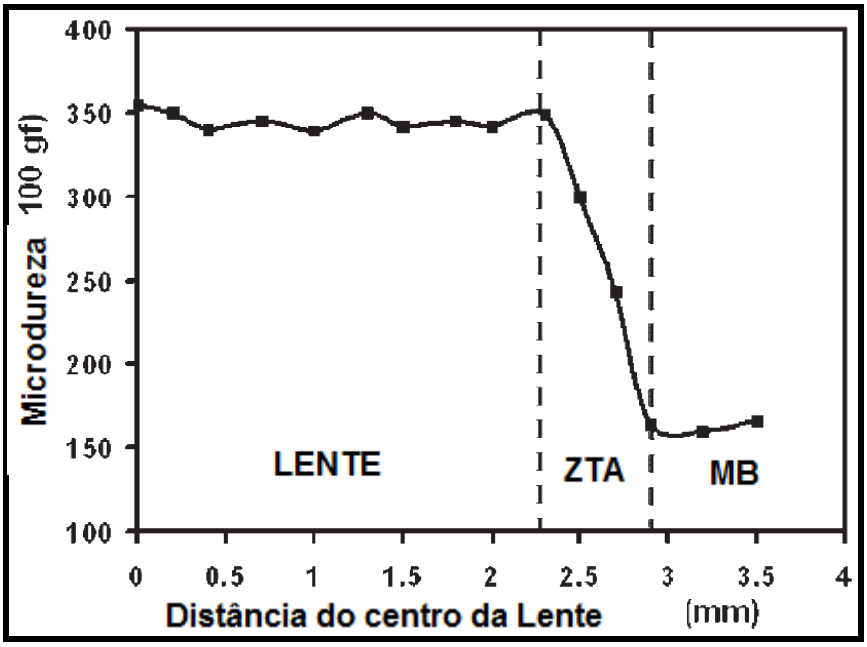


Figura III.35 – Gráfico com valores de dureza em solda a ponto por resistência em chapas de aço galvanizado baixo carbono (POURANVARI et al., 2008).

A tabela III.7 mostra um resumo das durezas médias dos parâmetros de soldagem selecionados no inicio da utilização dos eletrodos e ao final de sua utilização. Pode-se verificar que a média dos valores de dureza na ZTA e na lente da do ponto de solda teve uma redução do início das soldagens até o fim, quando os eletrodos já estavam deteriorados.

Tabela III.7: Média da dureza em diferentes zonas do ponto de solda.

	Dureza Média	
	INÍCIO	FIM
MB	97 ± 3,0	95 ± 3,7
ZTA	138 ± 9,6	111 ± 4,2
LENTE	180 ± 9,2	133 ± 7,8

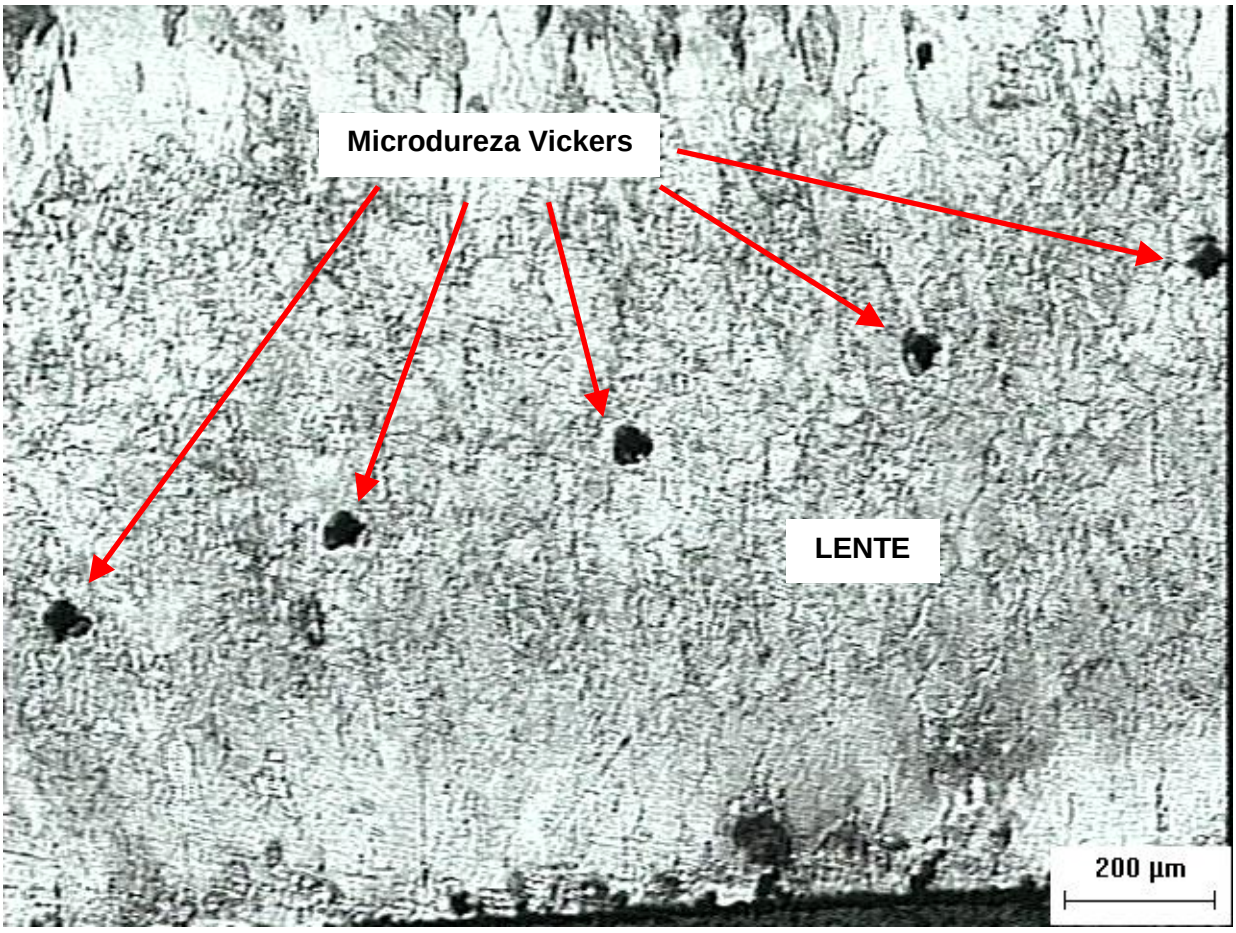


Figura III.36 – Detalhe de pontos de microdureza Vickers na lente da solda de parâmetros 9*cy* e 52%;

III.5. Avaliação de desgaste do revestimento.

A seguir observa-se sequências de imagens, figuras III.37, III.38, III.39 e III.40 dos pontos de solda obtidas através do microscópio óptico das sequencias de soldagem com os melhores parâmetros demonstrados de acordo com o item III.2. Em cada sequência de soldagem pode-se verificar o aumento de imperfeições, ou crateras, nas superfícies dos pontos de solda registradas à medida que o número de pontos de solda aumenta progressivamente, isso ocorre devido ao desgaste nas capas dos eletrodos, conforme evidenciado por INTERMACHINERY (2003), JOINING (1997), REU (1997) e TECNOWELDING (2004).

BRANCO (2004) avaliando em sua dissertação evidencia a presença de crateras, que são as depressões que aparecem na face dos eletrodos, conforme figura III. 7, que surgem na face do eletrodo sendo elas influenciadas por uma alta distribuição de densidade de corrente na borda da cratera a partir do seu aparecimento. A presença das crateras na face das capas dos eletrodos faz com que as chapas soldadas com estas capas passem a deixar marcas no ponto de solda, com o formato igual ao das crateras. Isto afeta o acabamento do ponto, que passa a ter uma superfície irregular. Apesar disto, o ensaio de arrancamento demonstra que as regiões marcadas pelas crateras permanecem soldadas no ponto resultante. À medida que o número de pontos vai aumentando, as identações nas chapas vão diminuindo e com isso também vão diminuindo a altura dos pontos de solda e o seu diâmetro, até chegar ao limite de não ocorrer fusão ou o ponto estar abaixo do seu valor mínimo, conforme mostrado na figura III.22. O processo de formação de crateras pode ser acelerado com o aumento nos níveis de tempo e corrente de soldagem, que também causam a expulsão de metal líquido. BRANCO (2004) ainda verificou que as crateras começam a surgir aproximadamente a partir de 300 pontos de solda e neste momento o seu crescimento é acelerado com o aumento do número de pontos de solda.

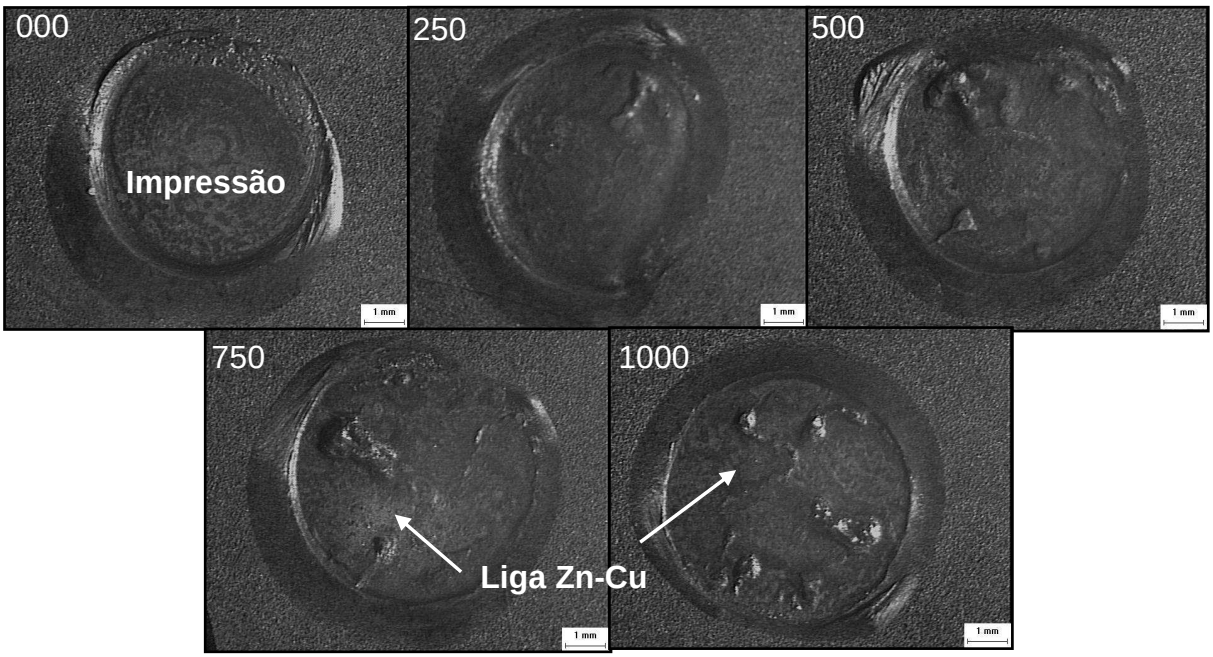


Figura III.37 – Seqüência de soldagem (até 1000 pontos de soldas) das superfícies de soldas com parâmetros de 200k*gf*; 8*cy* e 52%.

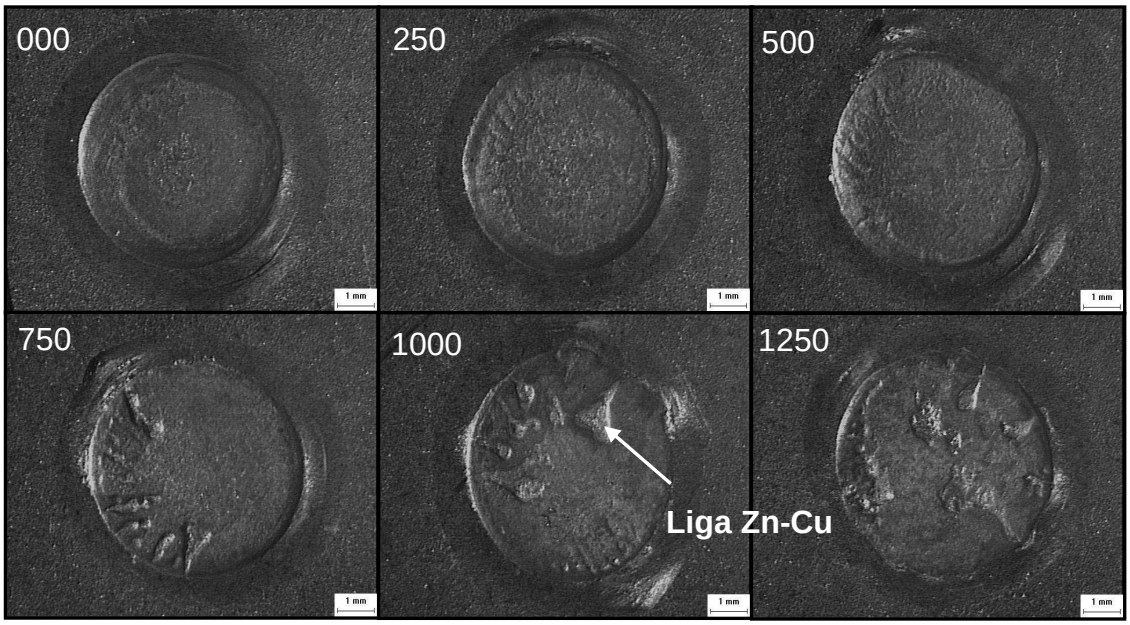


Figura III.38 – Seqüência de soldagem (até 1250 pontos de soldas) das superfícies de soldas com parâmetros de 200*kgf*; 9*cy* e 51%.

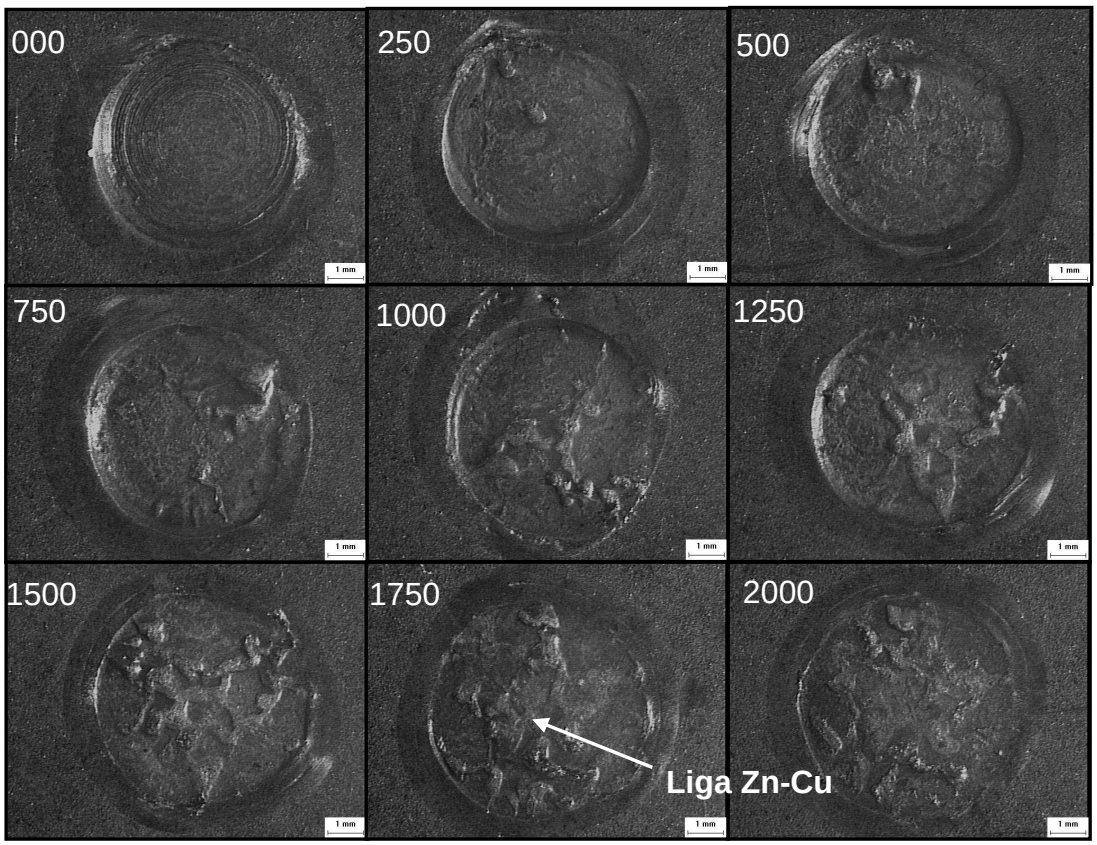


Figura III.39 – Seqüência (até 2000 pontos de soldas) das superfícies de soldas com parâmetros de 200*kgf*; 9*cy* e 52%.

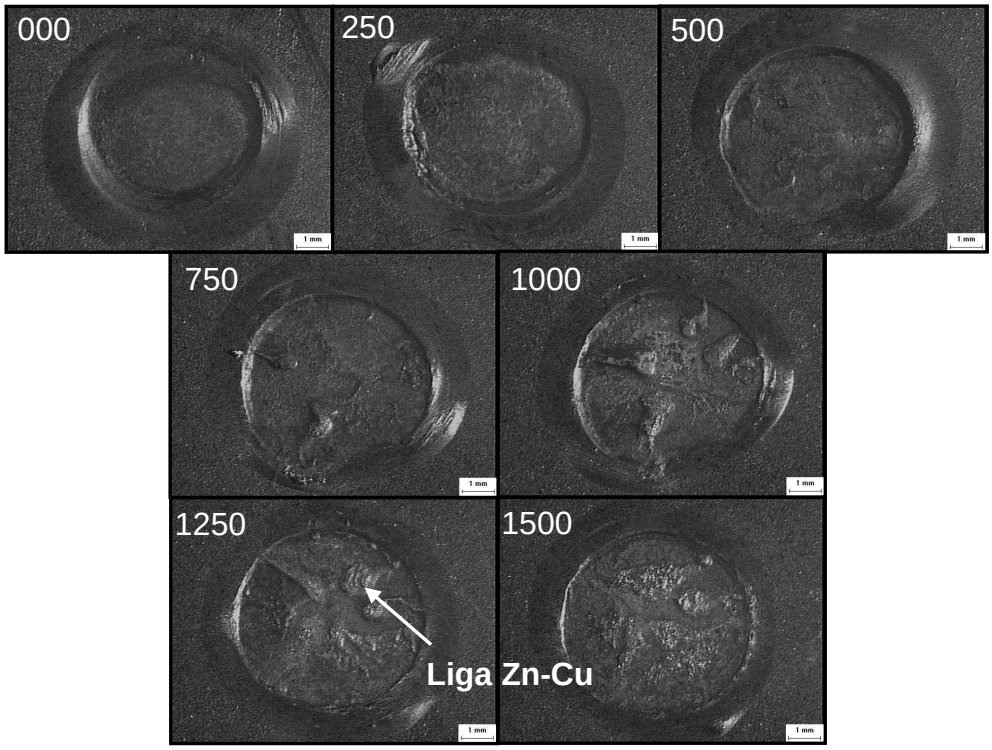


Figura III.40 – Seqüência (até 1500 pontos de soldas) das superfícies de soldas com parâmetros de 200*kgf*; 10*cy* e 51%.

JOAQUIN et al. (2007) avaliando as superfícies de identações obtidas em solda por resistência em aços de alta resistência, através de metodologia similar a deste trabalho verificou que a formação de vazios na superfície dos pontos de solda estão relacionados com o tempo de retenção.

Observa-se nas figuras III.41, III.42, III.43 e III.44, a seguir, a região soldada através da verificação por microscópio óptico nas secções dos pontos de solda com os quatro conjuntos de parâmetros ótimos selecionados. Foi possível observar três estruturas micrográficas distintas sendo elas o metal base (MB), a zona termicamente afetada (ZTA) e o metal de solda ou a lente de solda. A figura III.41 mostra esta divisão de estruturas.

Nas figuras III.45, III.46 e III. 47 são observados as microestruturas metal base, ZTA e Lente, respectivamente. A região do metal base é composta basicamente de ferrita, a Lente formada por martensita e a ZTA é caracterizada por uma região de crescimento de grãos. As características microestrurais das juntas soldadas obtidas são similares aos encontrados por GOODARZ et al. (2009) em chapas de aço galvanizado de baixo carbono com 1,1*mm* de espessura. A figura III.48 mostra a microestrutura encontrada por GOODARZ et al. (2009).

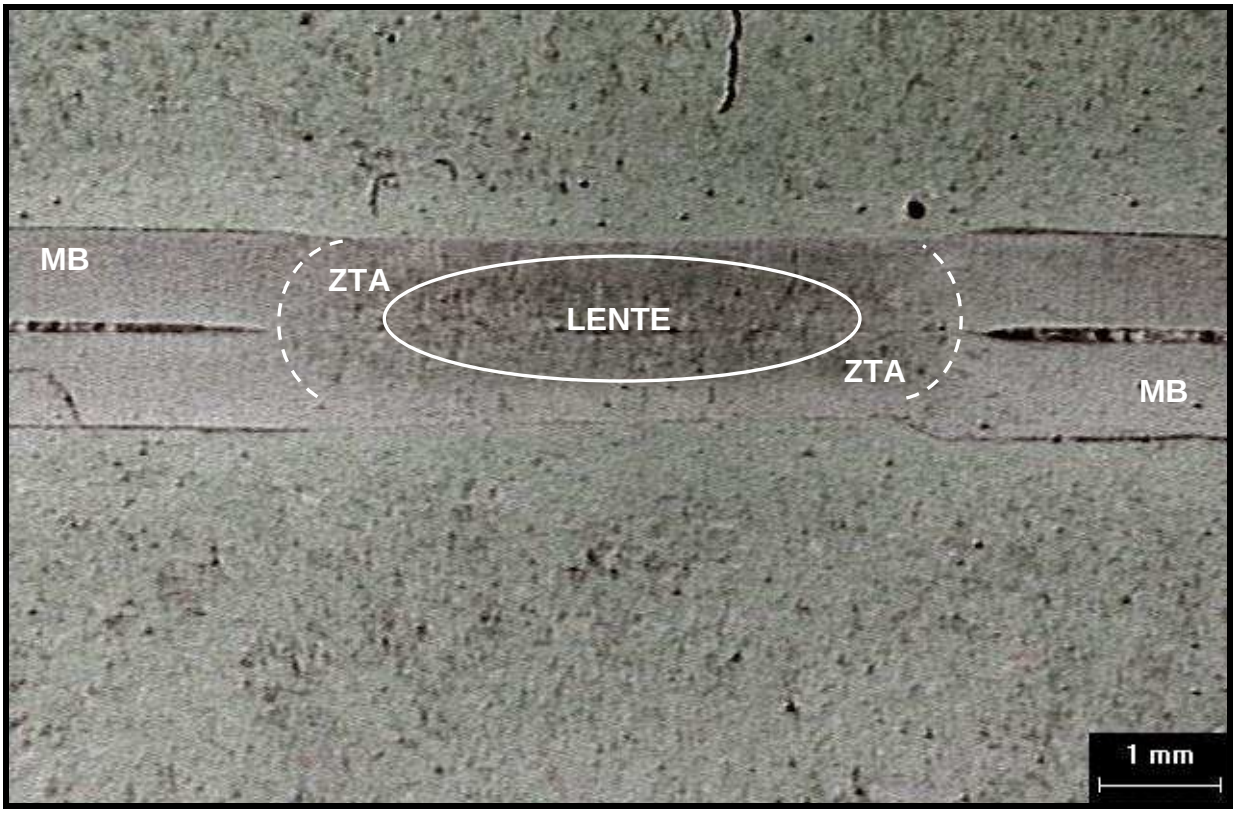


Figura III.41 – Secção transversal de uma solda a ponto por resistência utilizando parâmetros 8*cy* e 52% no início das soldagens.

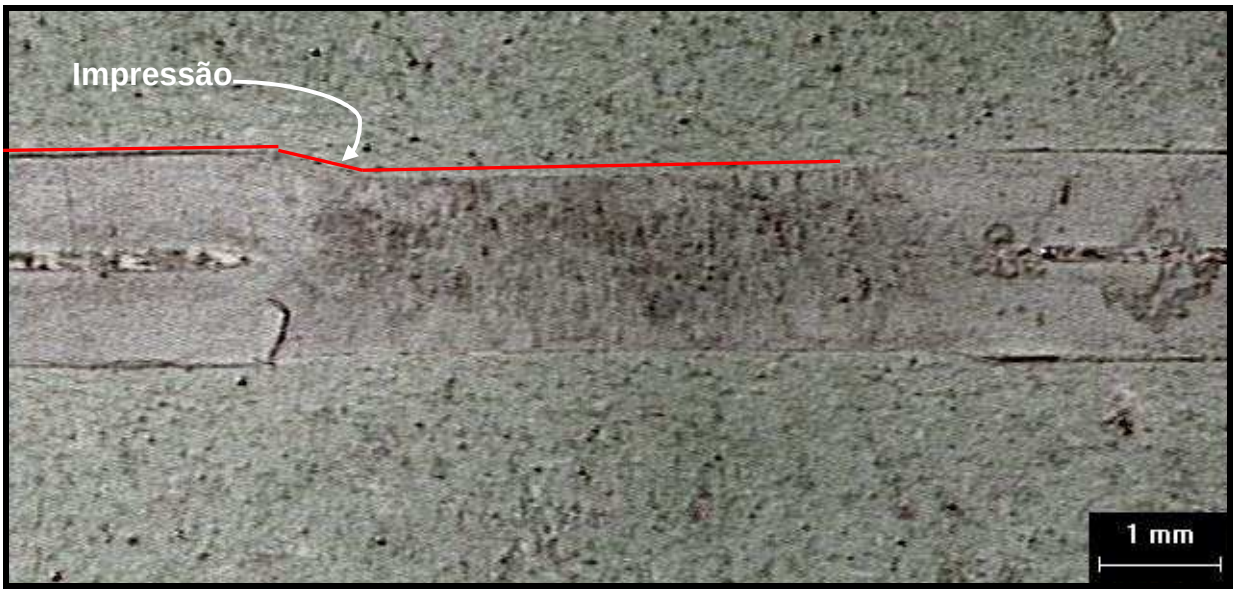


Figura III.42 – Secção transversal de uma solda a ponto por resistência utilizando parâmetros 9*cy* e 51% no início das soldagens.

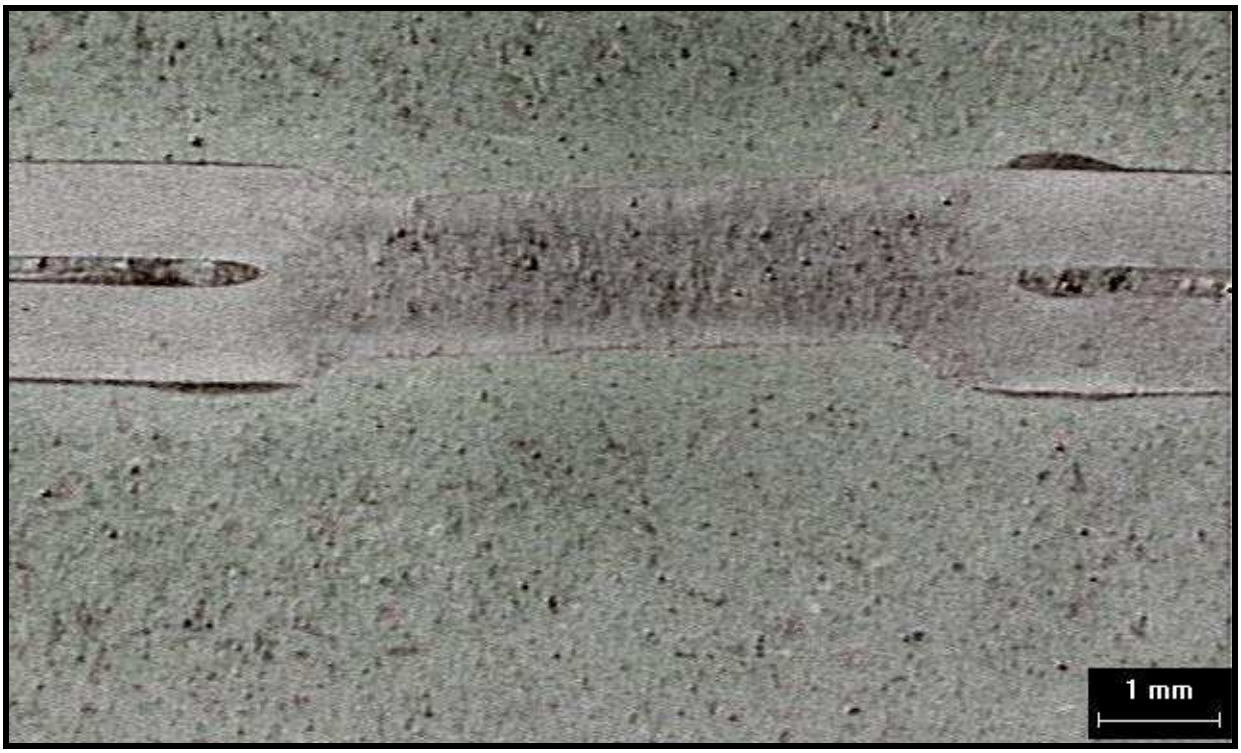


Figura III.43 – Secção transversal de uma solda a ponto por resistência utilizando parâmetros 9*cy* e 52% no início das soldagens.

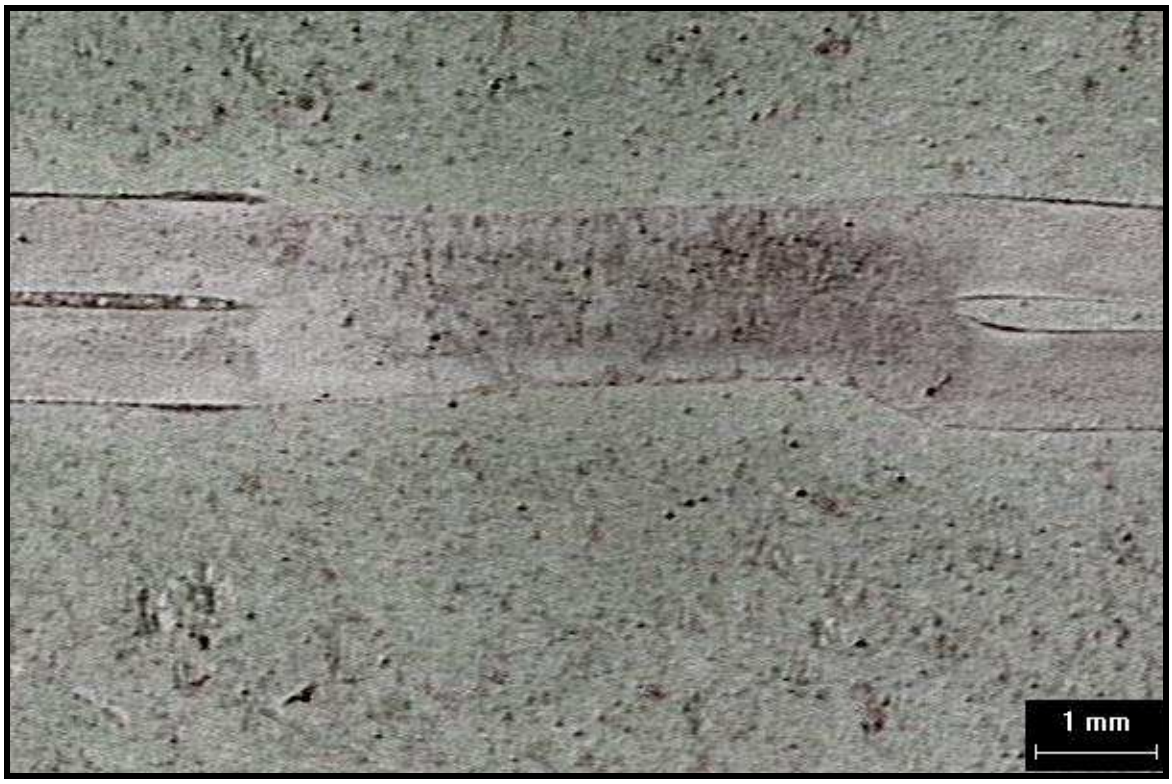


Figura III.44 – Secção transversal de uma solda a ponto por resistência utilizando parâmetros 10*cy* e 51% no início das soldagens.



Figura III.45 – Detalhe do MB do aço IF utilizado no presente estudo. Estrutura ferrítica. Aumento de 200x.



Figura III.46 – Detalhe da ZTA utilizando parâmetros 9*cy* e 51% no início das soldagens. Aumento de 200x.



Figura III.47 – Detalhe da Lente utilizando parâmetros 9*cy* e 51% no início das soldagens. Estrutura martensítica. Aumento de 200x.

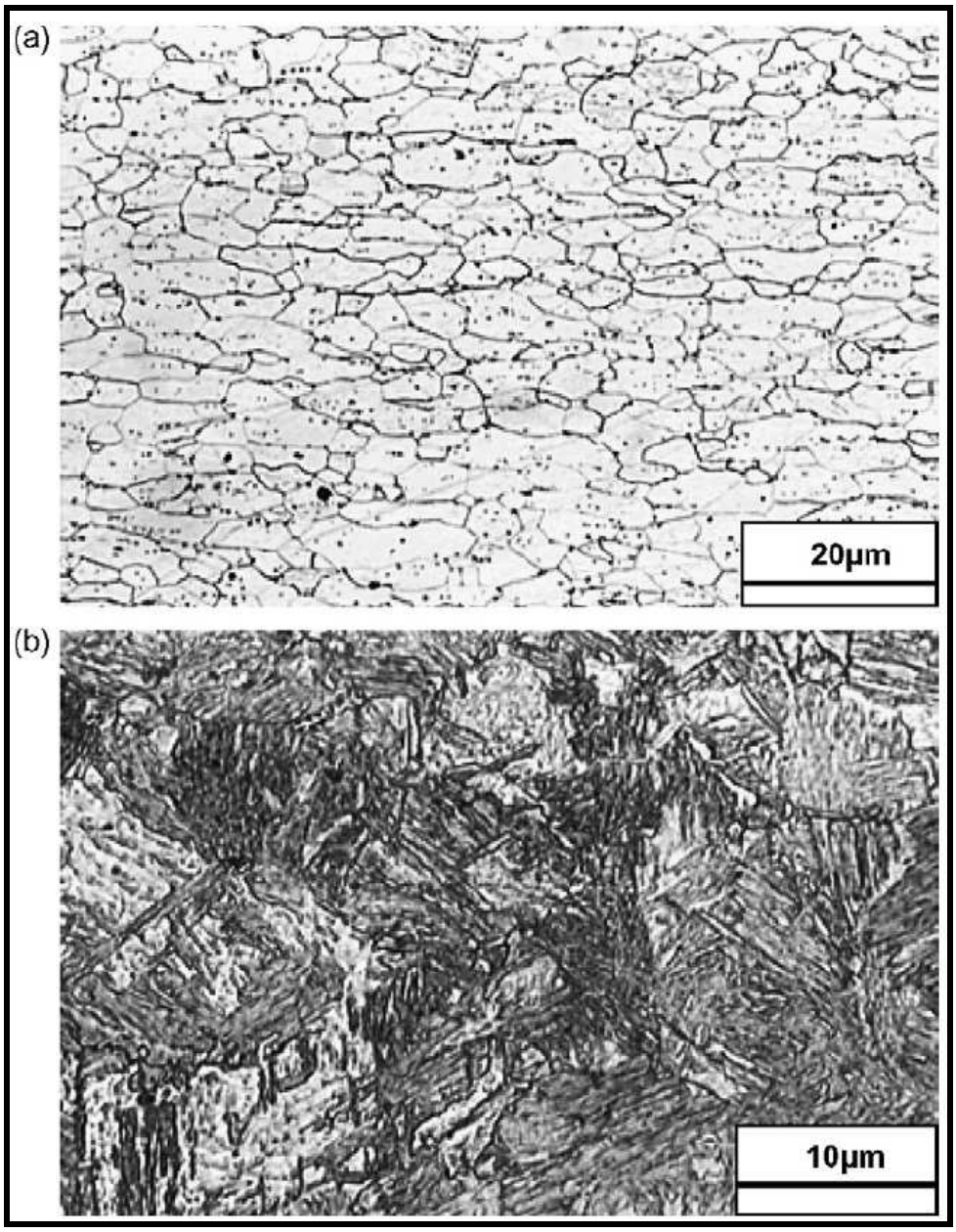


Figura III.48 – Microestruturas em chapas de aço galvanizado de baixo carbono. (a) Metal base. (b) Lente da solda. (GOODARZ et al., 2009).

III.6. Microscopia eletrônica de varredura.

A técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) com análise por espectrometria de energia dispersiva (EDS) foi usada para estudar aspectos de difícil avaliação por Microscopia Ótica (MO), como a espessura da camada de revestimento das chapas IF, além da possibilidade de identificação dos principais elementos presentes no revestimento e na região da junta soldada.

A seguir são apresentadas as micrografias de duas condições obtidas no MEV, sendo uma com parâmetros 8*cy* / 52% e 9*cy* / 52% no início das soldagens, ou seja, antes do desgaste dos eletrodos. Para cada micrografia foram obtidos espectros (EDS), de análise pontual, indicando os elementos de liga presentes. No canto superior esquerdo de cada imagem foi inserida sua localização na junta soldada.

A figura III.32 mostra a espessura da camada de revestimento cujo valor encontrado foi de 14,6 *µm*. Os quatro pontos indicam a localização para obtenção do espectro (EDS), que na figura III.30 mostra um aumento gradual do elemento Ferro e uma diminuição do Zn durante o deslocamento da superfície para o interior da chapa, conforme MIRANDA (2007) explica em seu estudo sobre as fases intermetálicas presentes nos revestimentos feita com a utilização da técnica de dissolução eletroquímica, microscopia eletrônica de varredura com análise por espectrometria de energia dispersiva (EDS) e difratometria de raios-X. O processo de recozimento promove a interdifusão do ferro e zinco, que pode levar à formação de fases intermetálicas Fe-Zn (Jordan, C.E; Marder,A .R,1994).

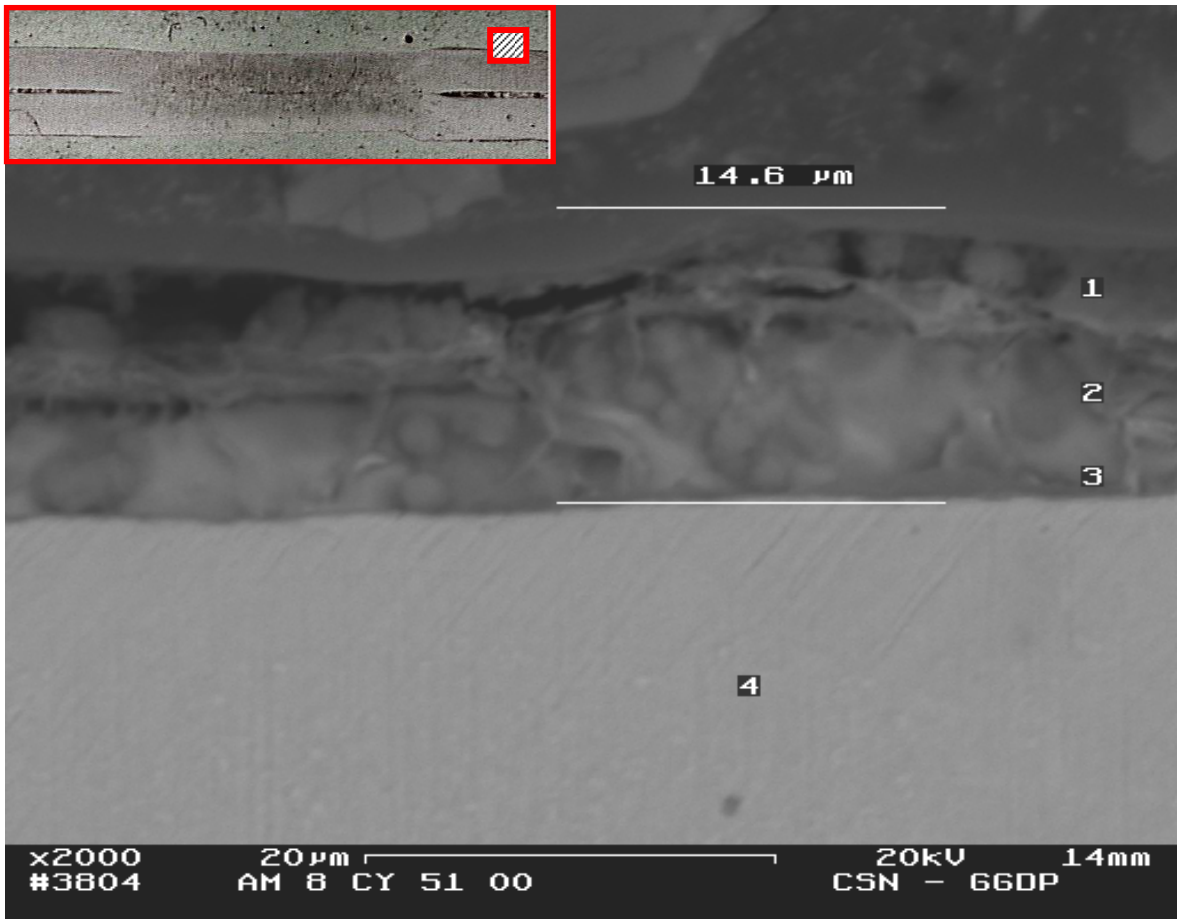
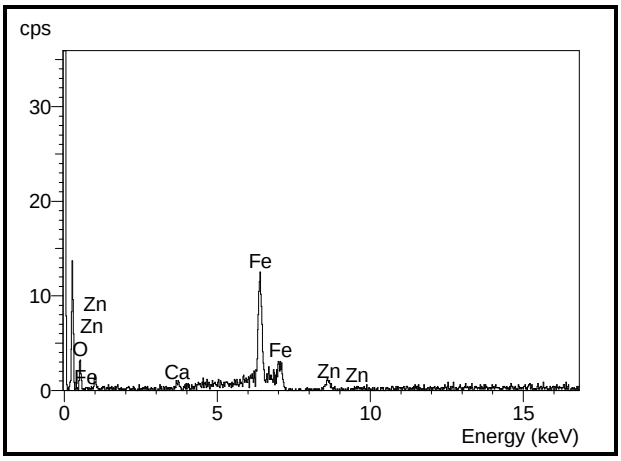
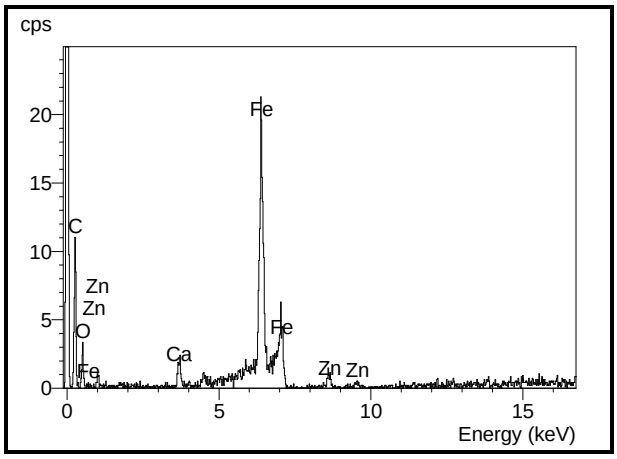


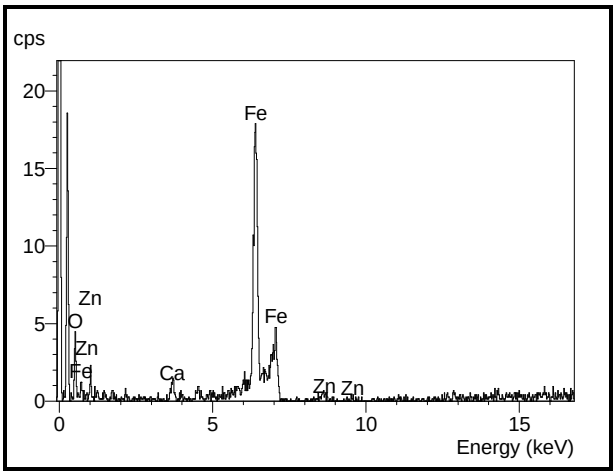
Figura III.32 – Morfologia da solda na superfície da chapa distante da lente de solda, utilizando parâmetros 8*cy* e 52% no início das soldagens. Aumento 2000x. Ataque Nital 10%.



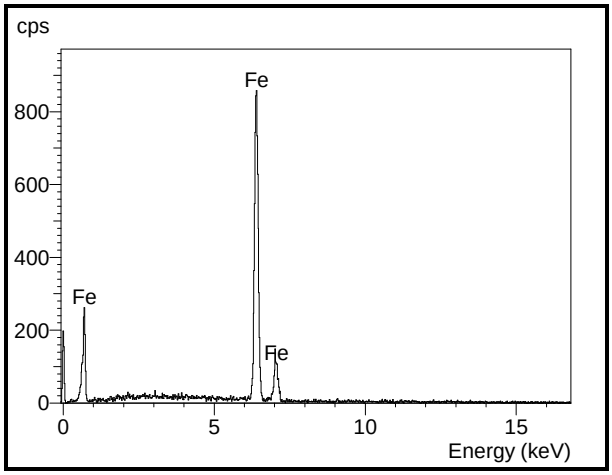
Ponto 1



Ponto 2



Ponto 3



Ponto 4

Figura III.33 – Espectro de EDS dos elementos dos pontos especificados na figura III.32. Parâmetros 8*cy* e 52% no início das soldagens.

A figura III.34 mostra a camada de revestimento de uma solda a ponto por resistência, com parâmetros utilizados de 8*cy* e 52%, na superfície do ponto de solda com uma espessura de 2,2 *μm*, representando uma redução de 6,5x. Essa redução é esperada devido ao elevado aporte térmico localizado e ao menor ponto de fusão do Zn (419*ºC*).

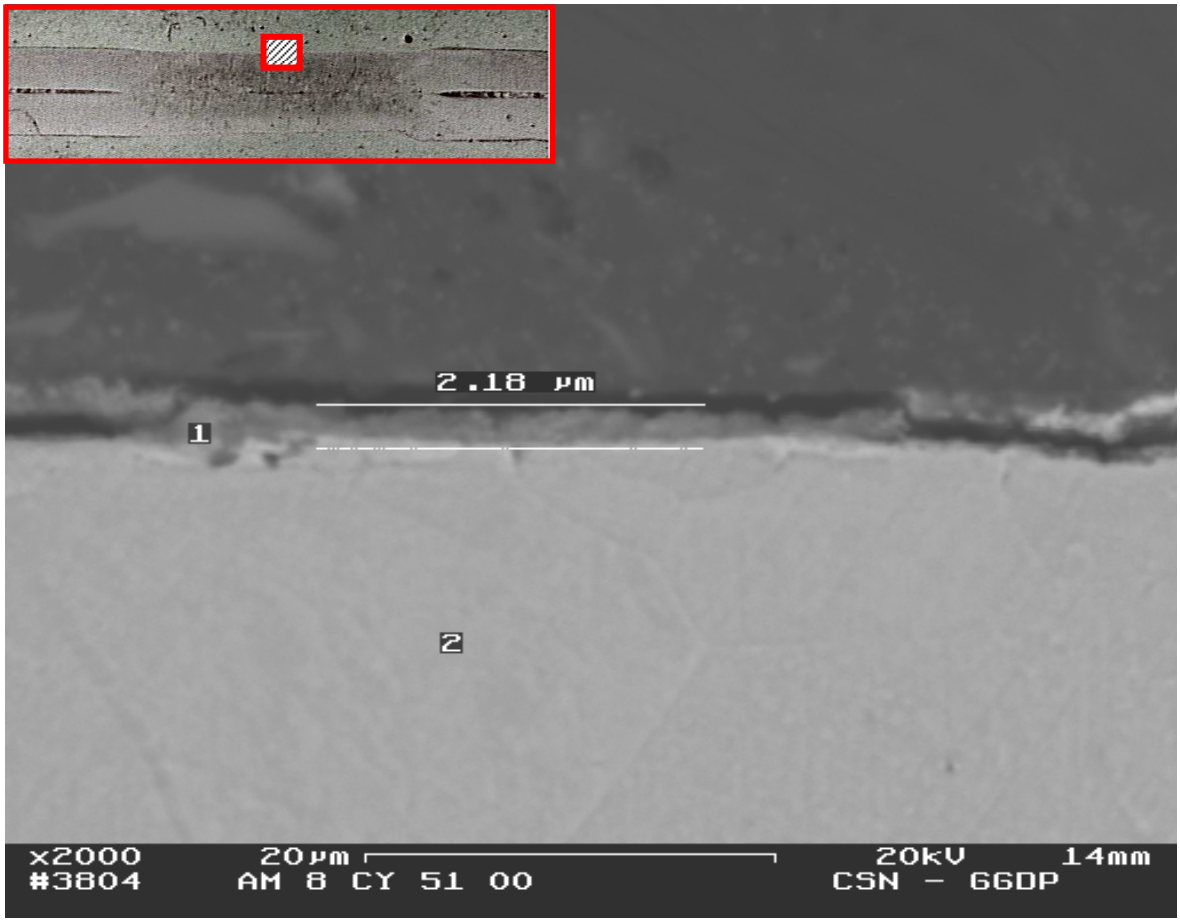
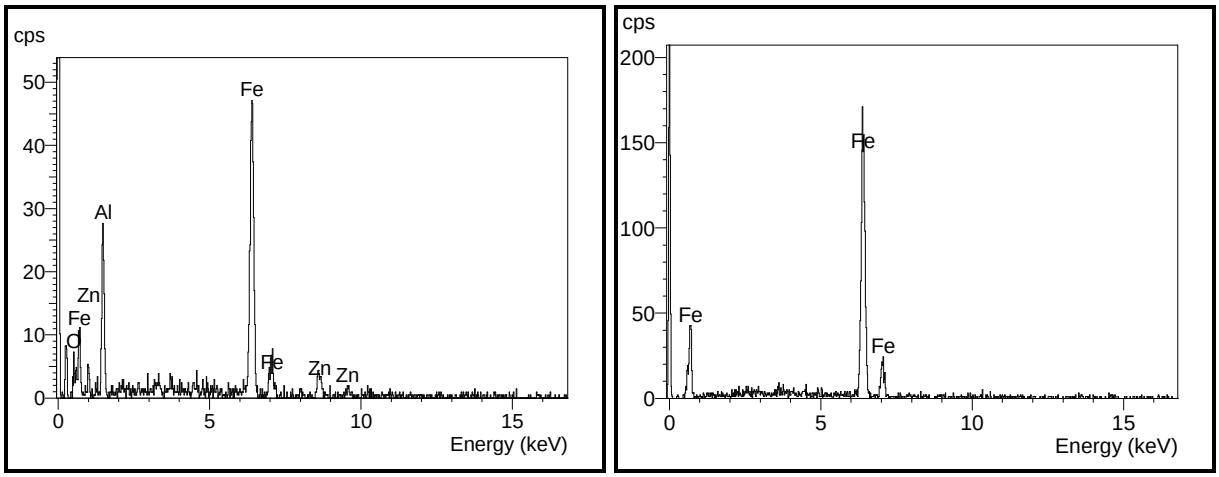


Figura III.34 – Morfologia da solda na superfície da chapa próxima à lente de solda, utilizando parâmetros 8*cy* e 52% no início das soldagens. Aumento 2000x. Ataque Nital 10%.



Ponto 1 Ponto 2

Figura III.35 – Espectro de EDS dos elementos dos pontos especificados na figura III.34. Parâmetros 8*cy* e 52% no início das soldagens.

A figura III.36 mostra o aspecto da zona de fusão, ou seja, a lente de solda. A estrutura é composta basicamente de grãos de ferrita.

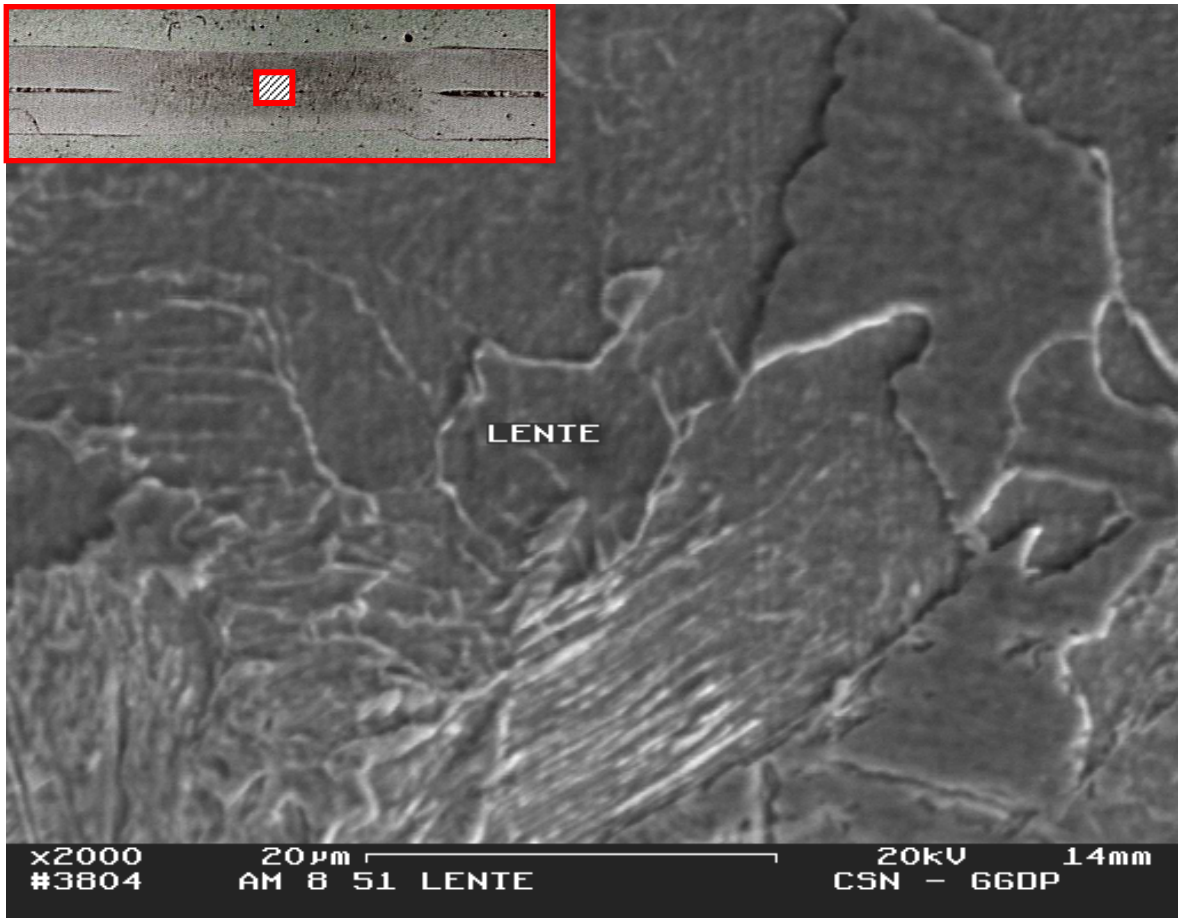


Figura III.36 – Morfologia da lente de solda, utilizando parâmetros 8*cy* e 52%. Aumento 2000x. Ataque Nital 10%.

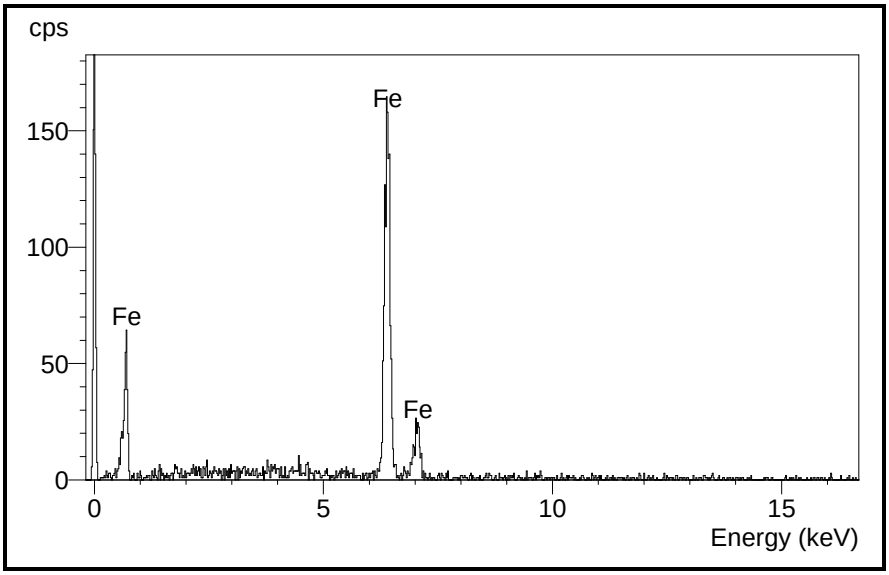


Figura III.37 – Espectro de EDS dos elementos da lente de solda especificado na figura III.36. Parâmetros 8*cy* e 52% no início das soldagens.

A figura III.38 mostra a região de interface das chapas na ZTA do ponto de solda e através do EDS, figura III.39, verificou-se a presença do Zn e Fe.

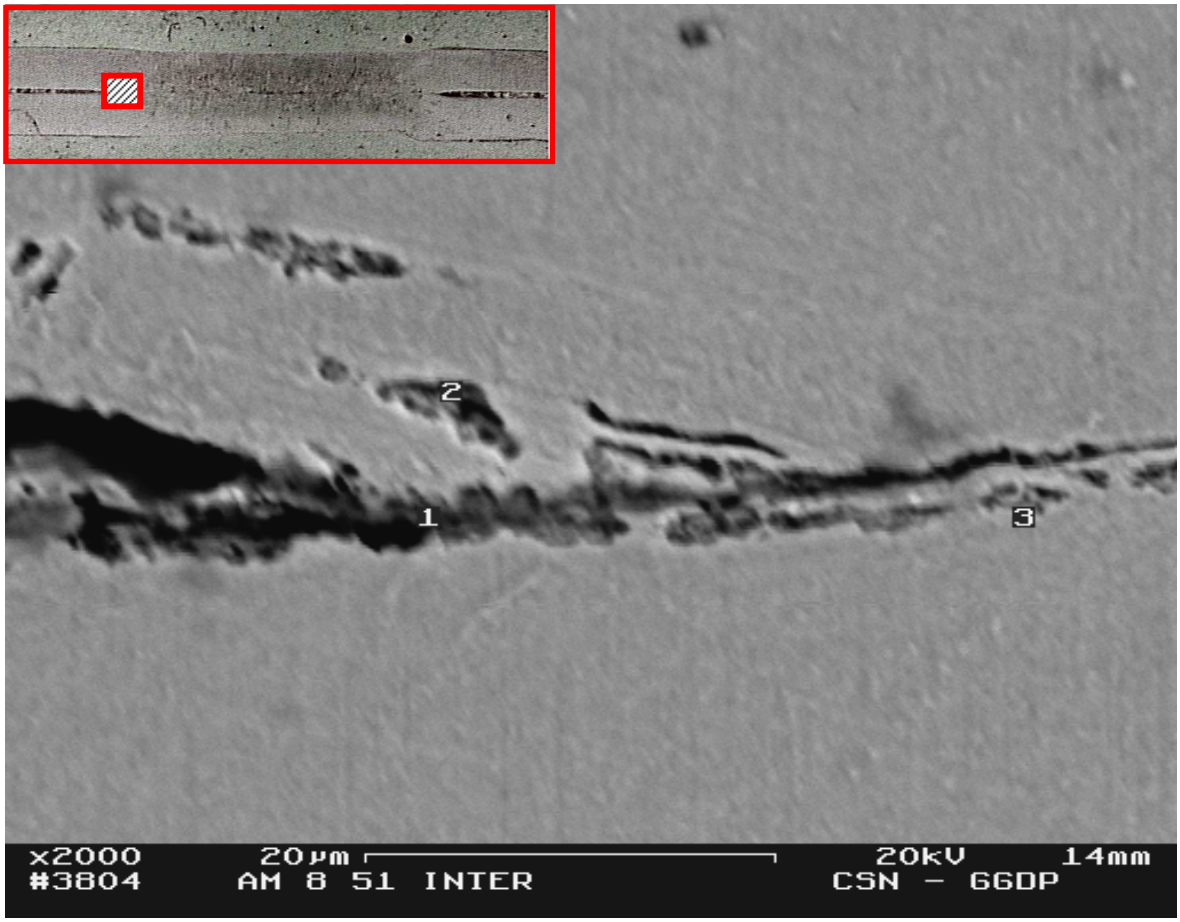
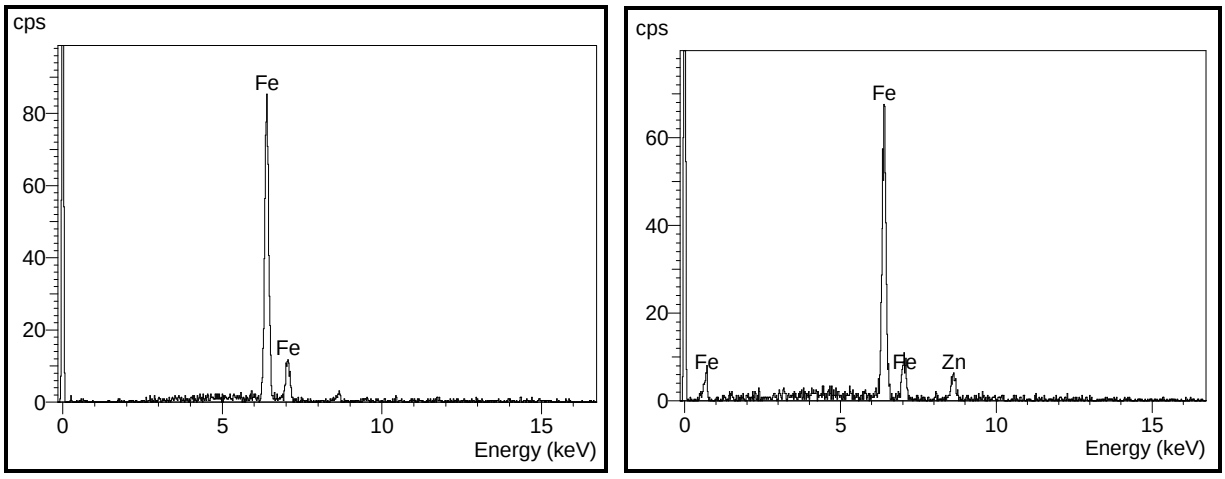
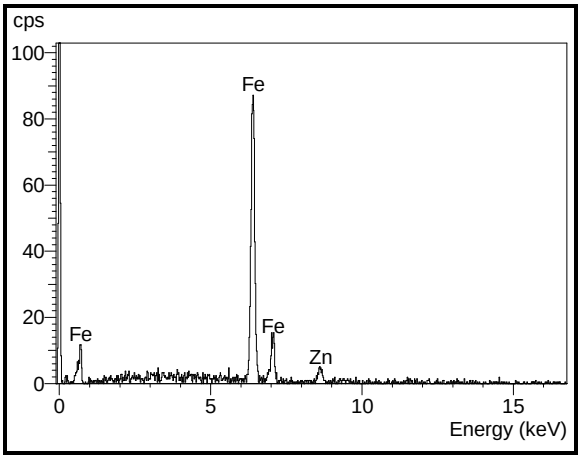


Figura III.38 – Morfologia da solda na interface das chapas, utilizando parâmetros 8*cy* e 52%. Aumento 2000x. Ataque Nital 10%.



Ponto 1 Ponto 2



Ponto 3

Figura III.39 – Espectro de EDS dos elementos dos pontos especificados na figura III.38. Parâmetros 8*cy* e 52% no início das soldagens.

A figura III.40 mostra a espessura da camada de revestimento de uma solda a ponto por resistência, com parâmetros utilizados de 9*cy* e 52%, cujo valor encontrado foi de 19,9 *µm*, seguido de seu espectros nos pontos indicados. A figura III.42 mostra que na região do ponto de solda esta camada de revestimento foi para 3,7 *µm*, redução de 5,3*x*. Menor que a redução da camada com parâmetros utilizados de 8*cy* e 52%.

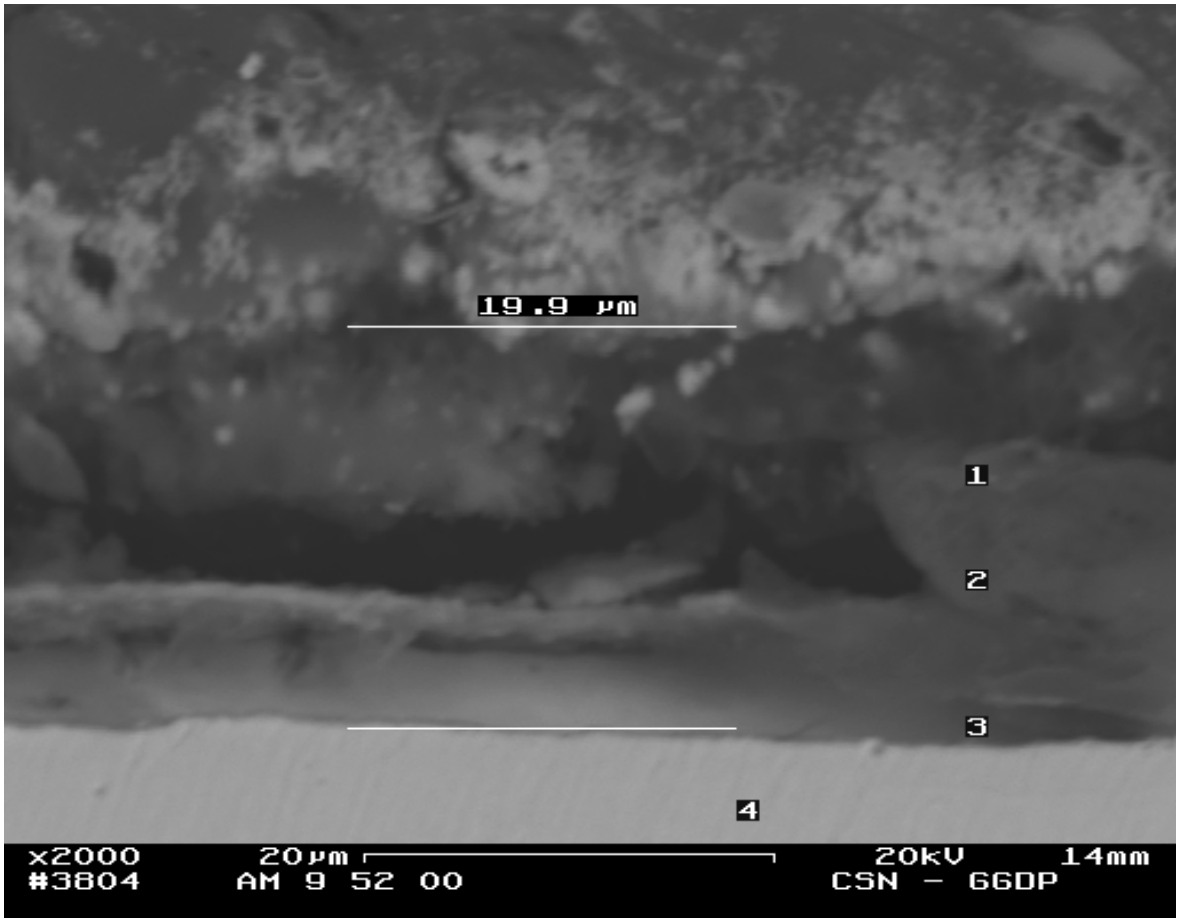
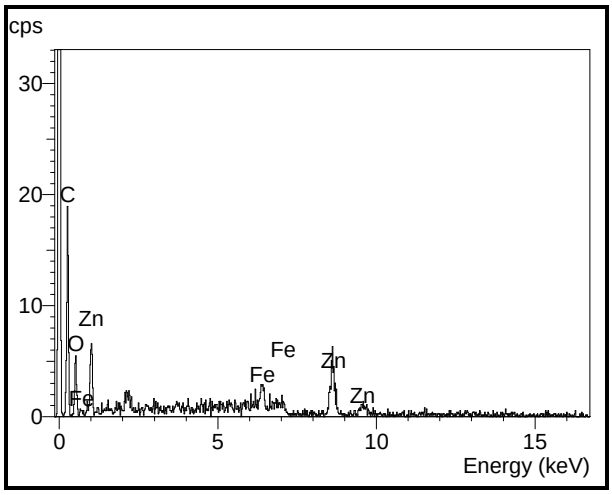
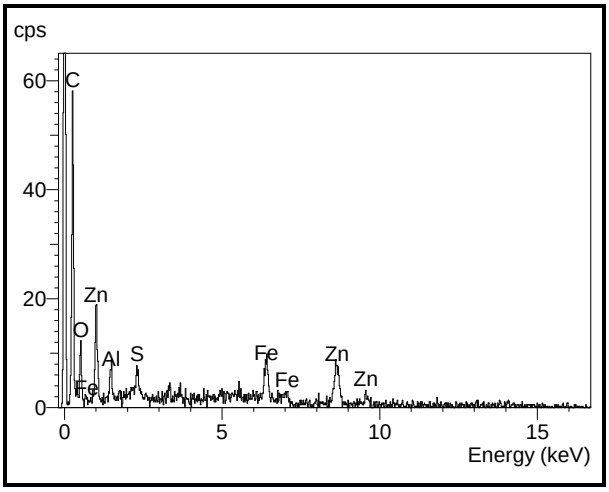


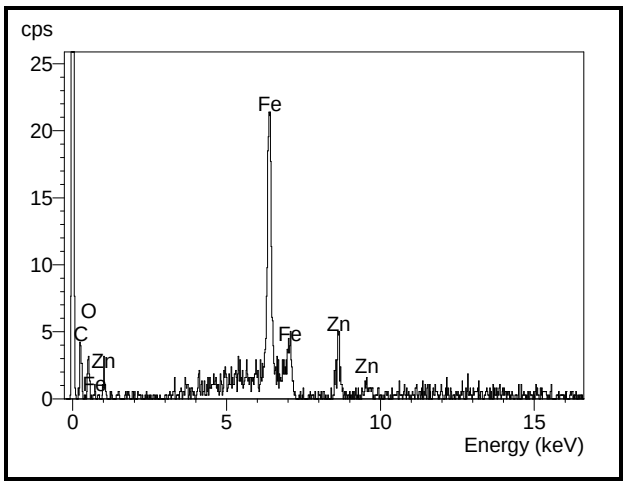
Figura III.40 – Morfologia da solda na superfície da chapa distante da lente de solda, utilizando parâmetros 9*cy* e 52% no início das soldagens. Aumento 2000x. Ataque Nital 10%.



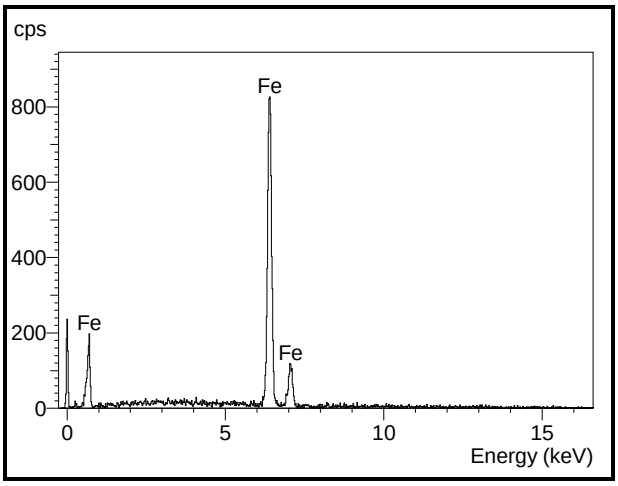
Ponto 1



Ponto 2



Ponto 3



Ponto 4

Figura III.41 – Espectro de EDS dos elementos dos pontos especificados na figura III.40. Parâmetros 9*cy* e 52% no início das soldagens.

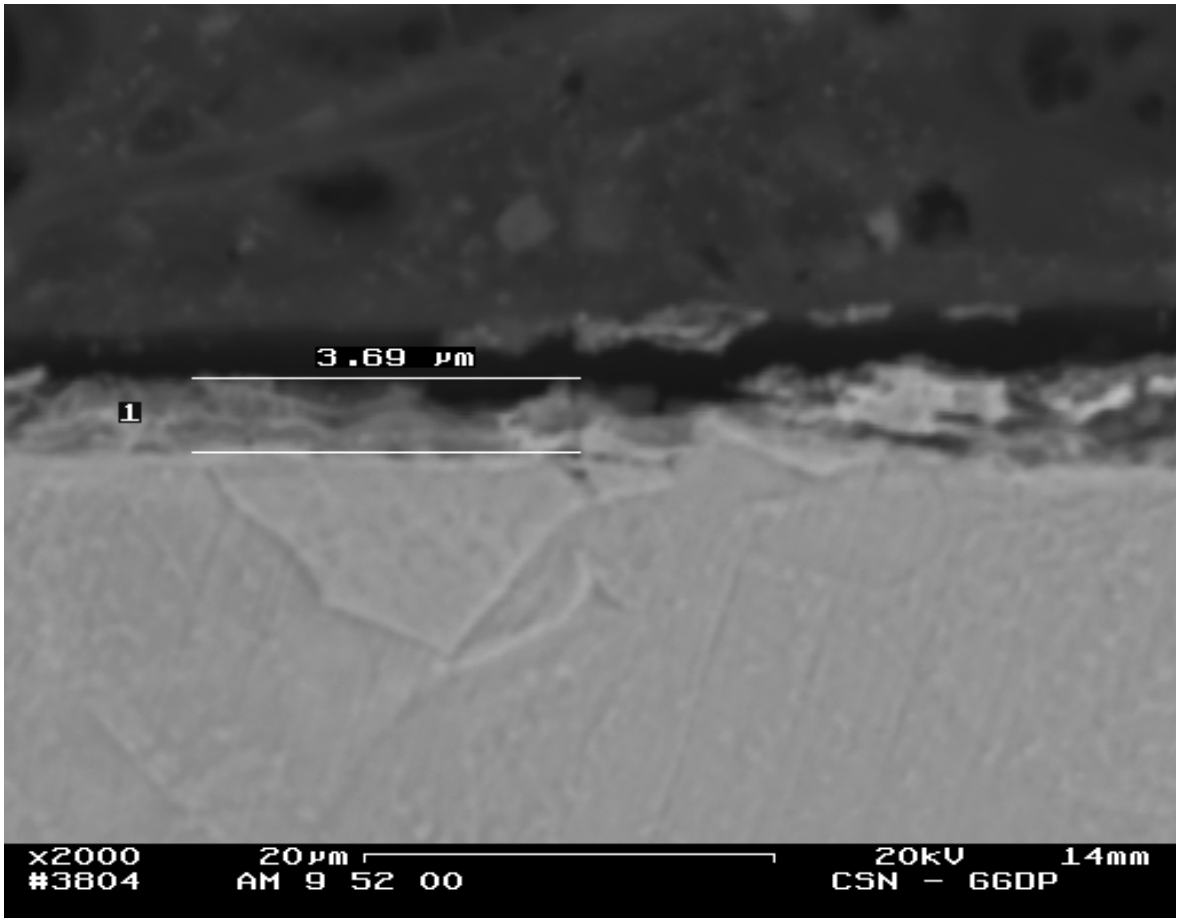


Figura III.42 – Morfologia da solda na superfície da chapa próxima à lente de solda, utilizando parâmetros 9*cy* e 52% no início das soldagens. Aumento 2000x. Ataque Nital 10%.

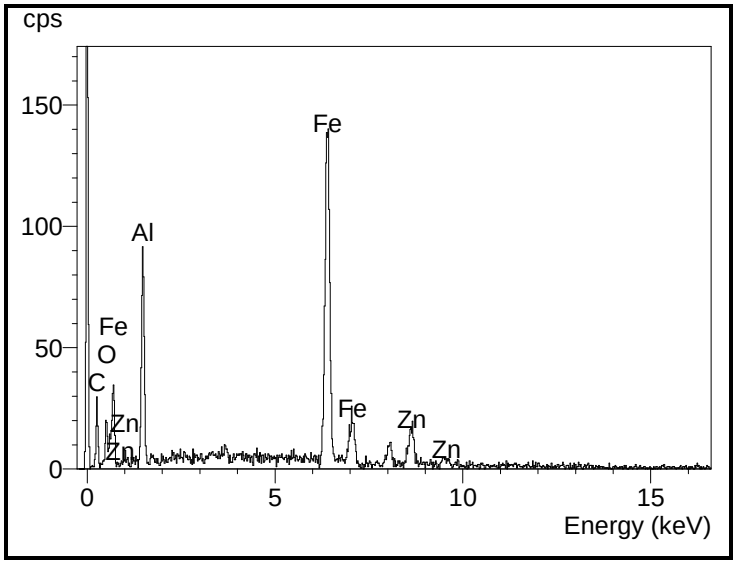


Figura III.43 – Espectro de EDS dos elementos no ponto especificado na figura III.42. Parâmetros 9*cy* e 52% no início das soldagens.

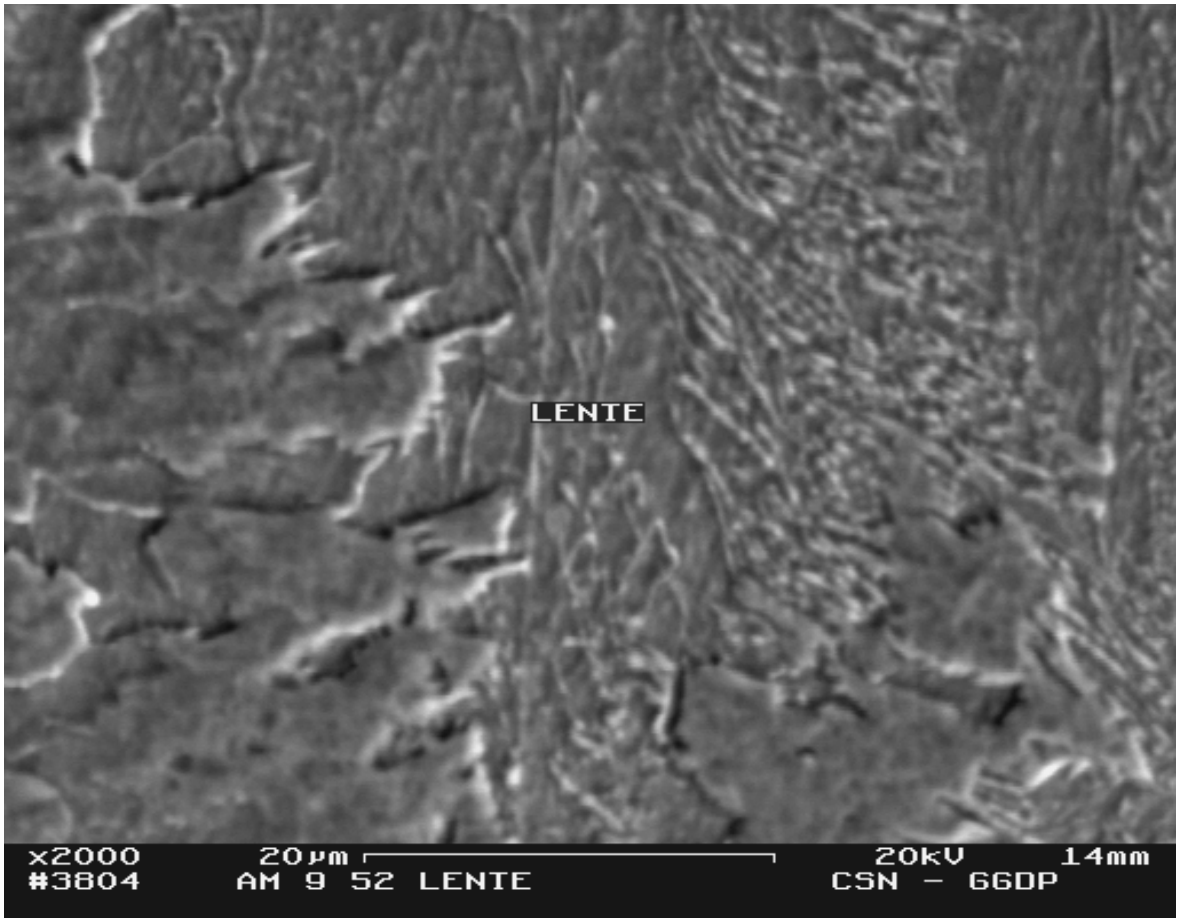


Figura III.44 – Morfologia da lente de solda, utilizando parâmetros 9*cy* e 52%. Aumento 2000x. Ataque Nital 10%.

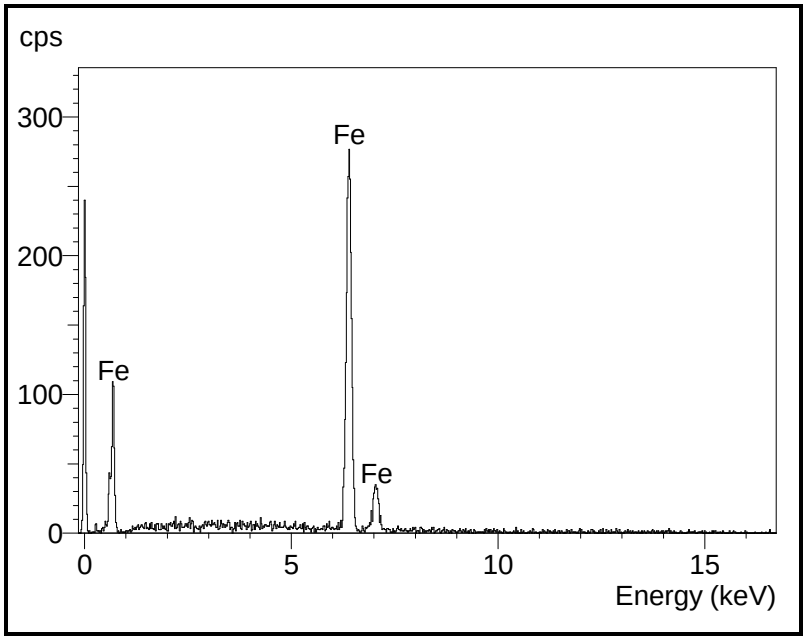


Figura III.45 – Espectro de EDS dos elementos da lente de solda especificado na figura III.44. Parâmetros 9*cy* e 52% no início das soldagens.

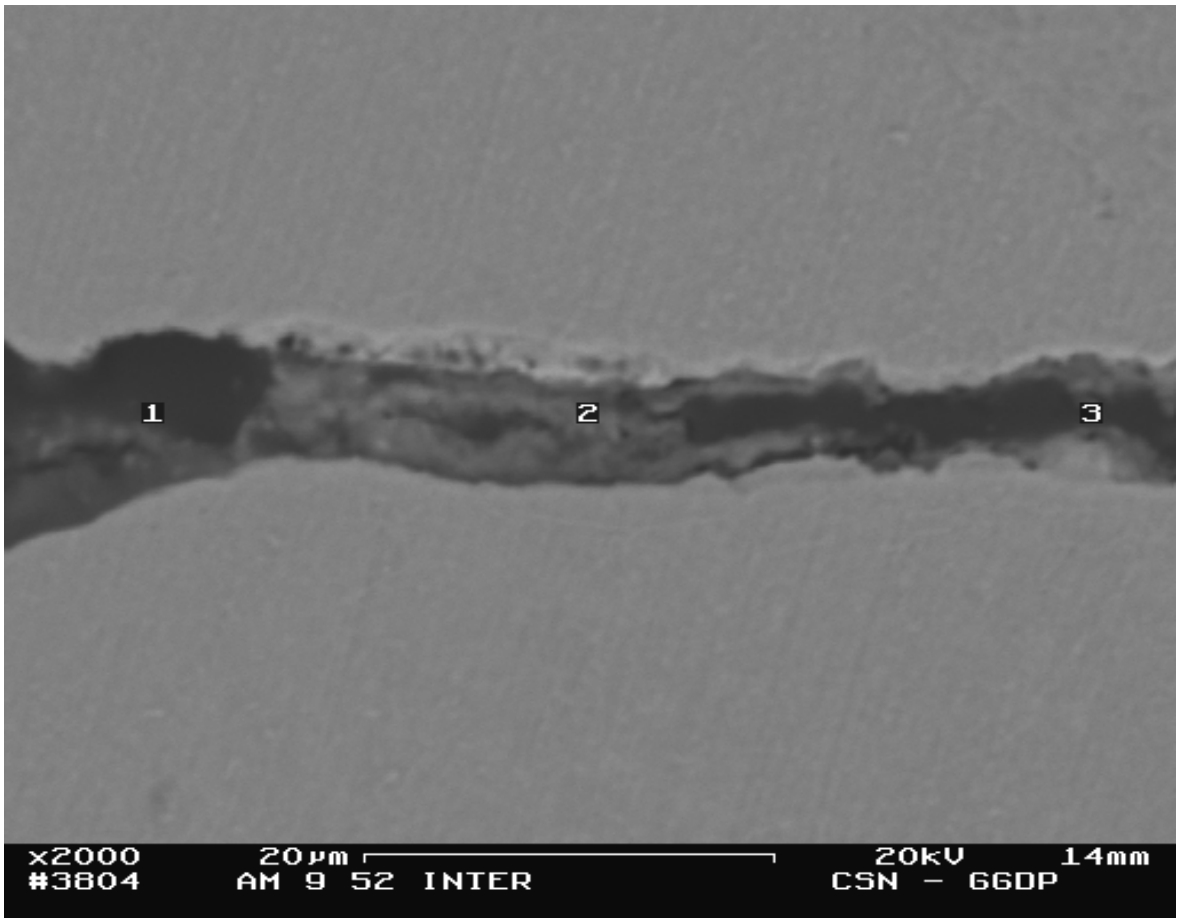
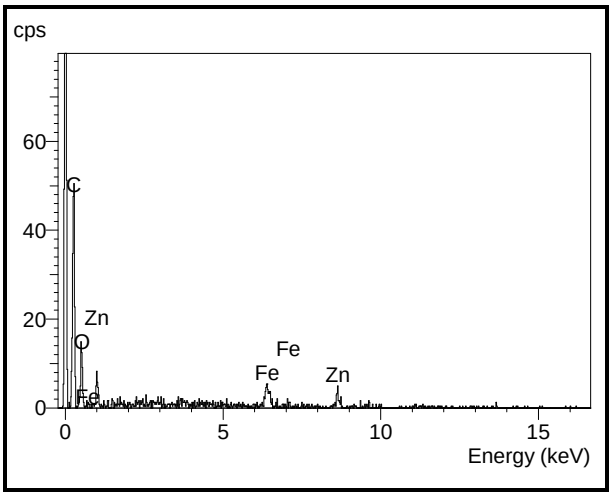
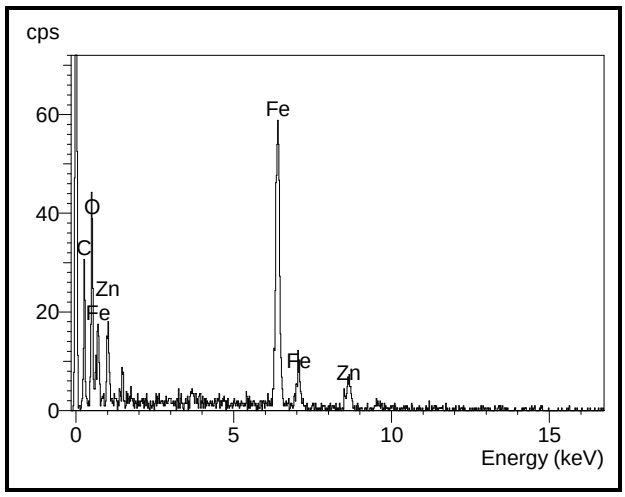


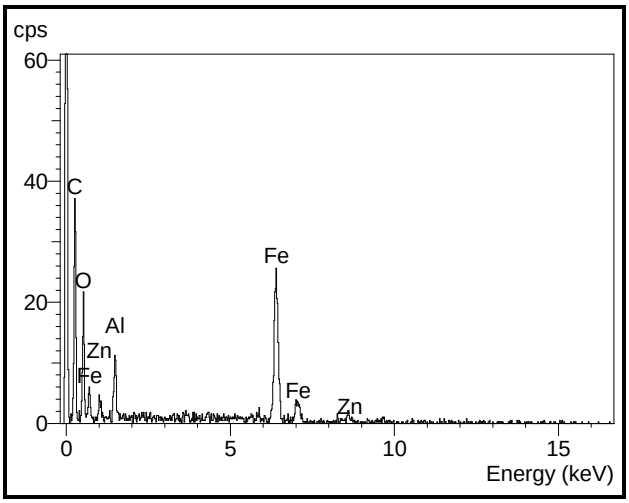
Figura III.46 – Morfologia da solda na interface das chapas, utilizando parâmetros 9*cy* e 52%. Aumento 2000x. Ataque Nital 10%.



Ponto 1



Ponto 2



Ponto 3

Figura III.47 – Espectro de EDS dos elementos dos pontos especificados na figura III.46. Parâmetros 9*cy* e 52% no início das soldagens.

O aparecimento do elemento químico alumínio (Al) na figura III.43 é devido ao polimento em alumina realizado durante a metalografia.

A soldabilidade do aço IF está relacionada diretamente com a resistência mecânica, avaliada através do ensaio de tração; a microestrutura, avaliada através de ensaio metalográfico com auxílio do MO; e a composição química resultante, avaliada através de EDS no MEV que, neste caso é confirmado a boa soldabilidade devido aos baixos teores de carbono conforme evidenciado nos espectros de EDS.

III.7. Considerações finais.

Tendo avaliado o conjunto dos inúmeros resultados apresentados nota-se a dificuldade de se obter informações que apontem para uma combinação ótima, que varie sensivelmente com modificação nos parâmetros, pois estes são interdependentes. Sendo considerados "combinações de parâmetros ótimos" os parâmetros selecionados dentro da curva de soldabilidade, ou seja, que apresentaram valores entre $4\sqrt{t}$ e $5\sqrt{t}$. A técnica utilizada, no presente trabalho, para seleção de parâmetros permitiu concluir que a melhor combinação, foi

a que utilizou os parâmetros de força dos eletrodos de 200*kgf*, tempo de soldagem de 9*cy* e 52% da potência da máquina de solda, que é equivalente a 7,8*kA* de corrente de soldagem, que admitiu a utilização das capas dos eletrodos em até 1250 pontos com soldas aceitáveis em chapas de aço IF. A vantagem é que esta combinação de parâmetros pode ser aplicada em outras condições, com outros parâmetros não avaliados como, por exemplo: tempo de retenção, tempo de pausa, tempo de compressão e tempo de pausa, ou até mesmo em materiais distintos para dar uma visão completa da qualidade da formação de solda.

Na prática, a fabricação de soldas de qualidade aceitável depende da definição de parâmetros de soldagem ótimos e a implementação de controles adequados para assegurar a qualidade da solda constante ao longo de uma produção. Desta forma esta metodologia pode possuir difícil aplicação caso não haja estes controles adequados. Alguns dos métodos para otimizar o processo de soldagem podem ser arranjados em Curvas de crescimento de solda e Gráficos de Soldabilidade, que são métodos aceitos na maior parte das industrias automotivas (CULLEN et al., 2007).

Muitas pesquisas têm sido desenvolvidas através da utilização de análises numéricas, para a simulação de soldas por resistência. A utilização destas tecnologias auxilia, na predição de características importantes como distribuição de temperatura na junta soldada, tamanho da Lente de solda, tamanho da impressão, resistência da junta soldada entre outros. Nas análises numéricas de soldas por resistência podem estar envolvidas análises estruturais, térmicas, eletrônicas ou a combinação destas em regime linear ou não-linear, dependendo da simplificação que se faça. MOORE et al., 2009 e CARVALHO et al., 2010 utilizaram esta tecnologia para a verificação da distribuição de temperatura e medição do tamanho da lente de soldagem em modelo bidimensional numa análise térmica transiente comparando com análise experimental em chapas de aços galvanizados. Trabalhos semelhantes também foram elaborados por EISAZADEH et al., 2010; ZHANG et al., 2008 e NIELSEN, 2008. CHAN, 2008 demonstra a possibilidade da utilização de programa customizado em soldagens por resistência.

Estudos têm sido direcionados para a introdução de inteligência artificial, como redes neurais, que permitirá uma redução no tempo em que uma solda é realizada, bem como adaptar o sistema a ser usado em máquinas diferentes, o que dará uma melhor velocidade de implantação e, consequentemente, reduzindo o tempo ocioso de produção (ABLEWHITE, 2007), conforme é visto na figura III.48.

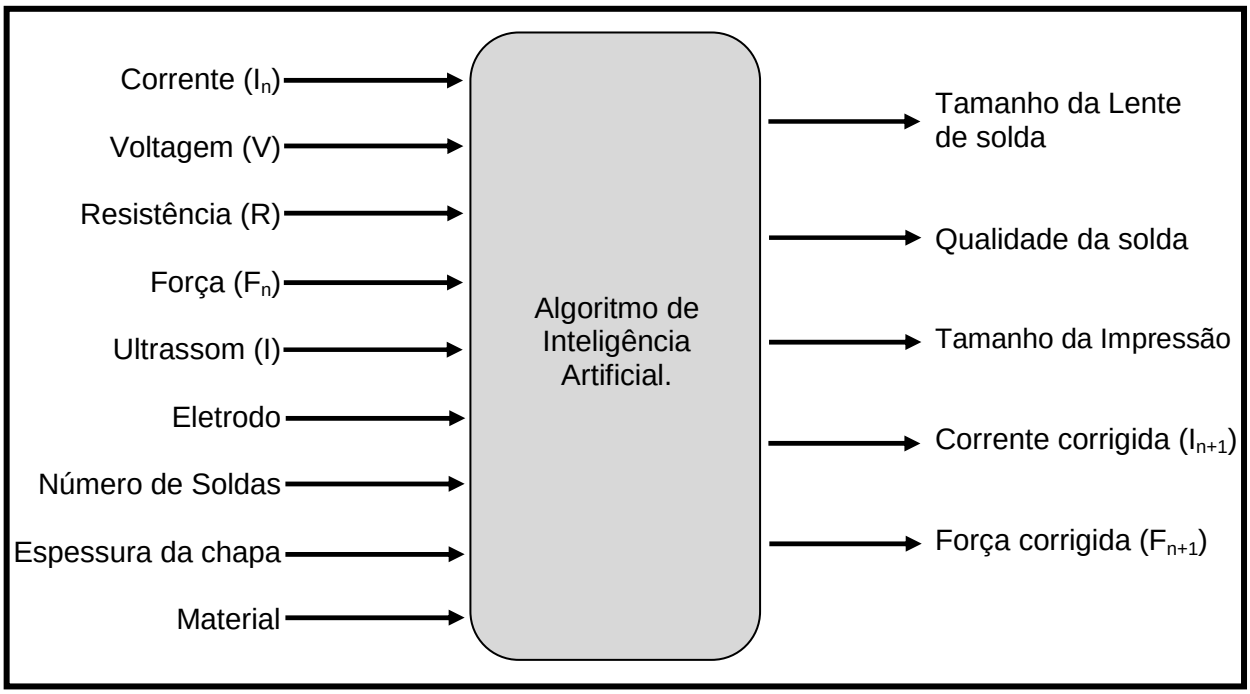


Figura III.48 – Modelo para utilização de Inteligência artificial aplicado em soldagens por resistência. (ABLEWHITE, 2007 - Modificado).

Observou-se, portanto que a utilização de capas de eletrodo do tipo 2 (RWMA 2.18200) de Cu/Cr, com os parâmetros especificados em chapas de aço IF, podem ser utilizadas mais do que a indústria automotiva recomenda para sua vida útil (aproximadamente 500 soldas), utilizando, desta forma, correntes de soldagem com valores mínimos para se produzir soldas aceitáveis. Logo, tem-se a vantagem de reduzir o consumo de energia no processo de soldagem, o que terá um impacto positivo tanto ecológico quanto financeiramente.

Capítulo IV – Conclusões

Com base nos resultados obtidos no presente estudo, que utilizou a otimização de parâmetros de soldagem (força, tempo e corrente de soldagem) no processo de soldagem a ponto por resistência, aplicado em chapas sobrepostas de aço “Interstitial Free” (IF) com 0,75*mm* de espessura utilizando um medidor de parâmetros para aquisição e monitoramento, é possível concluir acerca dos seguintes aspectos:

- O ajuste dos parâmetros de soldagem favorece o aumento da vida útil do eletrodo, garantindo uma melhoria na qualidade das soldas. Esta otimização dos parâmetros favorecem, em escala industrial, uma redução de custo promovido pela utilização adequada das capas do eletrodo até sua vida útil e um menor consumo de energia devido a uma baixa corrente de soldagem.

- Através do auxílio dos ensaios mecânicos de tração axial e de cisalhamento, a combinação dos parâmetros de tempo de soldagem de 9*cy*, potência da máquina de solda 52% (equivalente à corrente de 7,79*kA*) e 200*kgf* de força entre os eletrodos, oferece a melhor resposta para utilização dos eletrodos até 1250 pontos de solda sem o comprometimento significativo da resistência do ponto de solda.

- Verificou-se através dos ensaios de microdureza que esta soldagem promove um aumento considerável nos níveis de dureza do metal de solda e que os níveis de dureza caem consideravelmente quando as soldas são realizadas ao fim da vida útil das capas do eletrodo, o que pode ser explicado pelas alterações microestruturais ocorridas no eletrodo devido à formação de uma nova liga, antes não presente, de Zn-Cu (Latão).

- Com a microscopia óptica e de varredura é possível evidenciar a ampliação da presença de regiões de crateras, na medida em que o número de pontos de solda aumenta progressivamente, devido à formação da liga Zn-Cu nos eletrodos e a elevada densidade de corrente na superfície do ponto de solda. Também é possível verificar a predominância de ferrita nas estruturas micrográficas encontradas e realizar a medição das espessuras da camada de revestimento.

Capítulo V – Sugestões para trabalhos futuros

Os resultados obtidos através deste estudo não têm a pretensão de encerrar o assunto. Esta pesquisa buscou apresentar qualidade e clareza nos resultados, como o objetivo de trazer uma contribuição para que futuros pesquisadores possam examinar com maior profundidade o tema soldagem a pontos por resistência. Contudo, podem-se sugerir alguns pontos que surgiram no decorrer desta pesquisa e que, por não ser o objetivo principal, recomenda-se para futuros trabalhos.

- Estudo de outros parâmetros não avaliados como, por exemplo: tempo de retenção, tempo de pausa, tempo de compressão e tempo de pausa.

- Utilização de análise numérica, através do método de elementos finitos (MEF), para a simulação de soldas por resistência.

- Emprego de inteligência artificial, como redes neurais para otimização dos diversos parâmetros utilizados.

- Soldagem com materiais dissimilares e espessuras distintas.

- Estudo de viabilidade econômica para possível implementação em empresas interessadas.

- Implementação da Mecânica da Fratura nos estudos da soldagem po resistência.

Referências Bibliográficas

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

AVILLEZ, R. R., SILVA, A. L. V. C., ROCHA, A. C., "Efeito de Adição de Ti, Nb e S Sobre a Decomposição da Austenita e a Precipitação em Aços IF", *Revista ABM*, v. 1, n. 1, pp. 39-40, São Paulo, SP, Brasil, 2004.

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

BANERJEE, G., PAL, T. K., DAS, G., "Performance Evaluation of Resistance Spot Welding Interstitial Free Steel Under Cryogenic Conditions", *Journal of Testing and Evaluation*, vl. 37, n. 6, 2009.

BAYRAKTAR, E., KAPLAN, D., DEVILLERS,L., CHEVALIER, J. P., "Grain Growth Mechanism During the Welding of Interstitial Free (IF) Steels", *Journal of Materials Processing Technology*, v.189, pp. 114–125, 2006.

BLECK, W., "Development of Cold- Rolled Extra- Low Carbon Sheet Steels at Thyssen Stahl AG", Thyssen Stahl Publications, 1991.

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

CARVALHO, J.R.P. ; COSTA, H. R. M. ; DIAS, J.S. ; Moore, F., "Análise de Botões de Solda na União a Ponto por Resistência Elétrica de Chapas Galvanizadas". *Corte e Conformação de Metais*, v. Dez, pp. 92-101, 2010.

CHAKRABORTY, A., RAY, R. K., "Influence of Microstructure and Texture on the Formability Character of Industrially Produced Galvannealed Coatings on three IF Steels", *Surface & Coatings Technology*, v. 203, pp. 1756–1764, 2009.

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.

CHAN, K.R., SCOTCHMER, N., "Weldability Improvement Using Coated Electrodes for RSW of HDG Steel", 2006.

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.

CHUKO, W., GOULD, J., “Development of Appropriate RSW Practice for Tranformation-Hardened Steels”, 2002.

CULLEN, J. D., ATHI, N., AL-JADER, M. A., SHAW, A., AL-SHAMMA’A, A. I., “Energy Reduction for the Spot Welding Process in the Automotive Industry”, 2007.

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.

FUKUDA, N., SHIMIZU, M., Effect of Titanium Addition on the Improvement of r-value in Cold-Rolled Sheet Steels, Journal of Japan Society for Tecnology of Plasticity, 13 (142), 1972, p. 841-850.

GOMES, C. L. J., SOUSA, F. M., “Qualificação do Processo de Solda por Resistência”, 2007.

GUPTA, A. K., KUMAR, D.R., “Formability of Galvanized Interstitial-Free Steel Sheets”, *Journal of Materials Processing Technology*, v.172, pp. 225–237, 2006.

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

HALLYDAY, D., WALKER,J., RESNICK, R., “Fundamentos de Física - Vol. 2 - Gravitação, Ondas, Termodinâmica” 7ª ed., LTC, 2006.

HARLIN, N., JONES, T. B., PARKER, J. D., “Weld Growth Mechanism of Resistance Spot Welds in Zinc Coated Steel”, 2003.

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.

IOANNOU, J., Mechanical Behaviour And Corrosion of IF Steel to Aluminium Alloy Self-Piercing Riveted Joints, Ph.D. Thesis, University of Hertfordshire, Hertfordshire, England, 2009.

JOAQUIN, A., ELLIOT, A. N. A., JIANG, C., “Reducing Shrinkage Voids in Resistance Spot Welding”, 2007.

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.

LIN, P. C., LIN, S. H., PAN, J., Modeling of Failure near Spot Welds in Lap-Shear Specimens based on a Plane Stress Rigid Inclusion Analysis”, 2006.

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.

MATHEUS, J. R. G., **Texturas de Laminação a Morno em Aços Livres de Intersticiais (L.I.)**, Dissertação de M.Sc., Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1999.

MILLER, Handbook for Resistance Spot Welding, 2005.

MIRANDA, W. J., **Avaliação da Estampabilidade do Aço Livre de Intersticial Galvanizado a Quente por Imersão (GA, GI), Eletrogalvanizado (EG), Eletrogalvanizado e Pré-fosfatizado (EGP)**, Dissertação de M.Sc., Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil, 2007.

MODENESI, P.J., MARQUES P.V. e BRACARENSE, A.Q., “Soldagem Fundamentos e Tecnologia”, Ed. UFMG, 2007.

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 Assessment of Spot-Welded Sheets of Interstitial Free Steels”; *Journal of Materials Processing Technology*, 2008.

MUKHOPADHYAY, G.,BHATTACHARYA, S., RAY, K.K, “Strength of Spot-Welded Steel Sheets in Corrosive Environment”, *Materials and Corrosion*, v. 61, n. 5, 2010.

MZ USINAGEM. O que é Solda Ponto. Disponível em: <http://miltonzari.com.br/soldaponto.php>. Acesso em: 01 out. 2010.

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

PRADO, M. C., Desenvolvimento de Aços Interstitial Free (IF) pela Usiminas, Seminário COLAM-ABM, 1991.

PONCIANO, J. A. C., “Adequação de Espessura de Parede Projetada em Função de Processos de Corrosão Externa e Interna em Gasodutos”, In: Rio Oil Gas Expo and Conference, Rio de Janeiro, 2004.

POURANVARI, M., ABEDI, A., MARASHI, P. GOODARZI, M., “Effect of Expulsion on Peak Load and Energy Absorption of Low Carbon Steel Resistance Spot Welds”, 2008.

RADAKOVIC, D. J., TUMULURU, M., ”Predicting Resistance Spot Weld Failure Automotive Steels”, 2008.

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

SAHA, R., RAY, R. K., “Texture and grain growth characteristics in a boron added interstitial free steel”, *Materials Science and Engineering,* v. 527, pp. 1882–1890, 2010.

SANTELLA, M. L.,BABU, S.S., RIEMER, B.W.,FENG, Z., “Influence of Microstructure on the Properties of Resistance Spot Welds”, 1998.

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.

SCOTCHMER, N., Reducing Resistance Welding Costs”, 2007.

SILVA, M.R.S.; “Evolução da Laminação de Aços IF no Laminador de tiras a Quente da COSIPA”, *43º Seminário de Laminação - Processos e Produtos Laminados e Revestidos*, 2006.

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.

SUN, X., STEPHENS, V., KHALEEL, M. A., “Effects of Fusion Zone Size and Failure Mode on Peak Load and Energy Absorption of Advanced High-Strength Steel Spot Welds”, 2007.

TOKUNAGA, Y., YAMADA, M., ITOH, K.. Effect of Combined Addition of Nb and Ti on the Mechanical Propierties of Extra Low Carbon Steel Sheets, TETSU-TOHAGANÉ, nº 73, 1987, p. 109-116.

TSUNOYAMA, K., SATOH, S., YAMAZAKI, Y., ABE, H. “Recent Advanced in Interstitial- Free Steels for Formable Cold- Rolled Sheet Applications”. In: METALLURGY OF VACUUM-DEGASSED STEEL PRODUCTS, Ed. R. Pradhan, 1990, p. 127-140.

TUMULURU, M. D., ” Resistance Spot Weld of Coated High-Strength Dual-Phase Steels”, 2006.

TUMULURU, M. D., “The Effect of Coatings on the Resistance Spot Weld Behavior of 780 MPa Dual-Phase Steel”, 2007.

VURAL M., AKKUS, A. “On the Resistance Spot Weldability of Galvanized Interstitial Free Steel Sheets with Austenitic Stainless Steel Sheets”, 2004.

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.

YEUNG, K. S. and THORNTON, P. H., “Transient Thermal Analysis of Spot Welding Electrodes”, Welding Research, 1999.

YI, L., JINHE, L., HUIBIN, X., CHENGZHI, X., LIN, L., “Regression Modeling and Process Analysis of Resistance Spot Welding on Galvanized Steel Sheet”, 2009.

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, April 2003.