

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia

Departamento de Metalurgia

COMPARATIVO DE SOLDA PONTO POR RESISTÊNCIA ELÉTRICA COM
CORRENTE CONTÍNUA E SOLDAGEM ADAPTATIVA EM CHAPAS DA
INDÚSTRIA AUTOMOBILÍSTICA

Gabriela Aydos Marcondes

Trabalho de Diplomação

Orientador: Professor Dr. Afonso Reguly

Porto Alegre

2016

Por infortúnios da vida você não pode estar aqui para presenciar minhas conquistas.

A realização deste trabalho, e os feitos que ainda estão porvir, dedico à você:

meu pai, meu herói.

AGRADECIMENTOS

Ao marido e amigo Cristiano Altmann pelo apoio e dedicação durante a elaboração deste trabalho, bem como ao longo da graduação.

À minha mãe, Cibele, minha irmã, Natália, e minha avó, Izabel, pelas adversidades que enfrentamos juntas e que me fizeram amadurecer.

À toda a família Marcondes que apesar da distância me motivaram de uma maneira ou de outra, sendo pessoas batalhadoras e de grande caráter.

Aos meus amigos e à minha família emprestada, os Altmann's, por entenderem os momentos de ausência durante a fase final deste trabalho.

Ao Laboratório de Metalurgia Física da UFRGS e ao meu Orientador, Professor Dr. Afonso Reguly, pelo auxílio com os ensaios e suporte durante a elaboração deste trabalho.

Aos queridos colegas da engenharia de melhoria contínua da funilaria da General Motors em Gravataí, pelos momentos de descontração, ensinamentos e suporte para a realização deste trabalho, durante meu período de estágio na empresa.

Aos especialistas de manutenção, Henrique Neves, Diego Gonçalves, Erotide Pereira e Rafael Barbosa por toda a ajuda e pelas aulas de robótica.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	VI
LISTA DE TABELAS.....	XII
LISTA DE ABREVIACÕES E SÍMBOLOS	XIII
RESUMO.....	XV
ABSTRACT	XVI
1 INTRODUÇÃO.....	17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
2.1 Aços na indústria automobilística ou automobilística?	20
2.2 Estruturação de carrocerias.....	22
2.2.1 Principais componentes de um equipamento de soldagem a ponto por resistência elétrica	23
2.2.2 Processo de soldagem a ponto por resistência elétrica.....	23
2.2.3 Resistência dinâmica	27
2.2.4 Variações de processo	28
2.2.5 Defeitos em pontos de solda.....	29
2.2.6 <i>Feedback</i> adaptativo.....	32
2.3 Qualidade de pontos de solda na indústria automobilística.....	33
2.3.1 Ensaios não destrutivos	34
2.3.2 Ensaios destrutivos	35
Teste de arrancamento	35
Ensaio de tração (cisalhamento)	36
Ensaios metalográficos	38
3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	43
3.1 Corpos de prova.....	44
3.1.1 Chapas de aço	44

3.1.2	Espaçamento entre chapas - GAP.....	45
3.1.3	Presença de adesivo	46
3.1.4	Resíduo Metálico	47
3.2	Processo de soldagem	48
3.2.1	Definição de parâmetros e procedimento experimental	48
3.2.2	Curvas de resistência	50
3.3	Análises Laboratoriais	50
3.3.1	Macrografia	50
3.3.2	Micrografia	51
3.3.3	Perfil de microdureza	51
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	53
4.1	Curvas de resistência dinâmica.....	53
4.2	Análises Laboratoriais	58
4.2.1	Macrografias.....	58
4.2.2	Micrografias	62
4.2.3	Perfis de microdureza	70
5	CONCLUSÕES	74
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	76
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	77

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Evolução dos diversos tipos de aço de alta resistência ao longo das últimas décadas [Gorni, 2008].	20
Figura 2.2	Ilustração gráfica de diferentes tipos de aço utilizados em um veículo de passageiros. As cores refletem a resistência do aço. Fonte: http://www.cbmm.com.br/br/p/53/acos-automotivos-.aspx visitado em 06/02/2016.	21
Figura 2.3	Representação esquemática dos principais componentes de um equipamento de soldagem por resistência elétrica [Pinheiro, 2010].	23
Figura 2.4	Esquematização do processo de soldagem a ponto [Batista, 2011].	24
Figura 2.5	Representação do processo de soldagem a ponto por resistência elétrica para união de duas chapas. [Sampaio, 2010, modificado].	25
Figura 2.6	Distribuição de temperaturas nos componentes do circuito elétrico [Stocco e Gonçalves, 2003].	26
Figura 2.7	Esquema dos principais estágios da resistência dinâmica durante a formação do ponto de solda [Batista, 2011].	27
Figura 2.8	Expulsão de material líquido entre chapas. Uma das principais maneiras de geração de ruído de carrocerias em serviço [Rossi, 2007].	30
Figura 2.9	Comparativo entre dois pontos, um com a formação normal da lentilha de solda e outro com a má formação - ponto solto- decorrente de tempo insuficiente de aplicação de corrente [Batista, 2011, modificado].	31
Figura 2.10	Comparativo entre macroporosidades. Em (a) macroporosidade pequena - não discrepante [Nascimento, 2008] em (b) macroporosidade grande - discrepante [Stocco e Gonçalves, 2003].	32
Figura 2.11	Representação do posicionamento da talhadeira entre as chapas no teste com talhadeira e martelo [Stocco e Gonçalves, 2003].	34

Figura 2.12	Caminhos de propagação de trinca envolvidos em cada modo de falha [Pouranvari, Marashi e Mousavizadeh, 2010].....	36
Figura 2.13	Curvas típicas de carregamento vs. Deslocamento com os correspondentes modos de falha em testes de tração [Zhou, Hu e Zhang, 1999].....	37
Figura 2.14	Macrografia típica de ponto de solda [Pinheiro,2010].....	38
Figura 2.15	Temperaturas de transformação importantes no diagrama Fe-C, na região de baixo carbono [Kwietniewski e Kiss, 2013, modificado].....	39
Figura 2.16	Macroregiões de um ponto de solda associadas às temperaturas de transformação do aço [Batista, 2011, modificado].....	40
Figura 3.1	Fluxograma do ensaios e análises realizadas.	43
Figura 3.2	Recorte de 1450mmx557mm da chapa de aço utilizado para a confecção dos corpos de prova.	45
Figura 3.3	Espessura do recorte da chapa de aço, medida com especímetro Kroeplin Laengenmesstechnik C1X027.	45
Figura 3.4	Representação das estruturas dos corpos de provas simulando GAP's (A) 0,870 mm (B) 1,74 mm (C) 2,61mm e (D) 3,48 mm. Em vermelho o destaque da região onde o ponto de solda analisado foi aplicado.....	46
Figura 3.5	Representação da estrutura do corpo de prova com a presença de adesivo entre as chapas. Em vermelho o destaque da região onde o ponto de solda analisado foi executado.....	47
Figura 3.6	Representação da estrutura do corpo de prova com a presença de resíduo metálico entre as chapas. Em vermelho o destaque da região onde o ponto de solda analisado foi aplicado.	48
Figura 3.7	(a) Robô Fanuc R-2000iB 210F utilizado para soldagem dos corpos de prova. (b) em 1 controlador de solda da Welding Technology Corp (WTC), tipo GWS-2D-C1B, modelo 6005 e em 2 Controlador do Robô Fanuc R-2000iB 210F.....	48
Figura 3.8	Eletrodos esféricos padrão utilizados para a soldagem dos corpos de prova. À esquerda vista superior e à direita vista lateral esquerda.	49

Figura 3.9	Ponto de referência aos quais parâmetros foram utilizados na soldagem dos corpos de provas.	49
Figura 3.10	Representação das regiões, em roxo, as quais as microdureza foram analisadas. Marcações em vermelho representam as indentações realizadas.	52
Figura 4.1	Curvas de resistência dinâmica para GAP de 0,87 mm entre chapas. Soldagem com corrente constante na imagem superior e com corrente adaptativa na imagem inferior.	53
Figura 4.2	Curvas de resistência dinâmica para GAP de 1,74 mm entre chapas. Soldagem com corrente constante na imagem superior e com corrente adaptativa na imagem inferior.	54
Figura 4.3	Curvas de resistência dinâmica para GAP de 2,61 mm entre chapas. Soldagem com corrente constante na imagem superior e com corrente adaptativa na imagem inferior.	54
Figura 4.4	Curvas de resistência dinâmica para GAP de 3,48 mm entre chapas. Soldagem com corrente constante na imagem superior e com corrente adaptativa na imagem inferior.	54
Figura 4.5	Curvas de resistência dinâmica dos corpos de prova com adesivo entre chapas. Soldagem com corrente constante na imagem superior e com corrente adaptativa na imagem inferior.	55
Figura 4.6	Curvas de resistência dinâmica dos corpos de prova com resíduo metálico entre chapas. Soldagem com corrente constante na imagem superior e com corrente adaptativa na imagem inferior.	55
Figura 4.7	Macroestruturas dos pontos de solda com GAP de 0,87 mm entre chapas. À esquerda o ponto de solda produzido com corrente constante e à direita o ponto de solda com corrente adaptativa.	58
Figura 4.8	Macroestruturas dos pontos de solda com GAP de 1,74 mm entre chapas. À esquerda o ponto de solda produzido com corrente constante e à direita o ponto de solda com corrente adaptativa.	58

Figura 4.9	Macroestruturas dos pontos de solda com GAP de 2,61 mm entre chapas. À esquerda o ponto de solda produzido com corrente constante e à direita o ponto de solda com corrente adaptativa.....	59
Figura 4.10	Macroestruturas dos pontos de solda com GAP de 3,48 mm entre chapas. À esquerda o ponto de solda produzido com corrente constante e à direita o ponto de solda com corrente adaptativa.....	59
Figura 4.11	Macroestruturas dos pontos de solda contendo adesivo entre chapas. À esquerda o ponto de solda produzido com corrente constante e à direita o ponto de solda com corrente adaptativa.....	59
Figura 4.12	Macroestruturas dos pontos de solda contendo resíduo metálico entre chapas. À esquerda o ponto de solda produzido com corrente constante e à direita o ponto de solda com corrente adaptativa.....	60
Figura 4.13	Pontos de solda com GAP de 0,87mm entre chapas, com um aumento de 50x. À esquerda o ponto de solda produzido com corrente constante e à direita o ponto de solda com corrente adaptativa. Presença de microporosidades - pontos pretos- exemplificados pelas setas.....	62
Figura 4.14	Pontos de solda com GAP de 0,87mm entre chapas, com um aumento de 200x na região do núcleo fundido. À esquerda o ponto de solda produzido com corrente constante e à direita o ponto de solda com corrente adaptativa. Formação da martensita exemplificada pelas setas.	63
Figura 4.15	Pontos de solda com GAP de 1,74mm entre chapas, com um aumento de 50x. À esquerda o ponto de solda produzido com corrente constante e à direita o ponto de solda com corrente adaptativa. Presença de microporosidade - ponto preto- indicada pela seta.	64
Figura 4.16	Pontos de solda com GAP de 1,74mm entre chapas, com um aumento de 50x. À esquerda o ponto de solda produzido com corrente constante e à direita o ponto de solda com corrente adaptativa. Formação da martensita exemplificada pelas setas.....	64
Figura 4.17	Pontos de solda com GAP de 2,61mm entre chapas, com um aumento de 50x. À esquerda o ponto de solda produzido com corrente constante e à direita o ponto de solda com corrente adaptativa. Presença de	

	microporosidades - pontos pretos- exemplificados pelas setas. Poros discrepantes para a corrente soldagem com corrente contínua.....	65
Figura 4.18	Pontos de solda com GAP de 2,61mm entre chapas, com um aumento de 200x. À esquerda o ponto de solda produzido com corrente constante e à direita o ponto de solda com corrente adaptativa. Formação da martensita exemplificada pelas setas.....	65
Figura 4.19	Pontos de solda com GAP de 3,4mm entre chapas, com um aumento de 50x. À esquerda o ponto de solda produzido com corrente constante e à direita o ponto de solda com corrente adaptativa. Presença de microporosidades - pontos pretos- exemplificados pelas setas. Poros discrepantes para ambos os métodos.	66
Figura 4.20	Pontos de solda com GAP de 3,48mm entre chapas, com um aumento de 200x. À esquerda o ponto de solda produzido com corrente constante e à direita o ponto de solda com corrente adaptativa. Formação da martensita exemplificada pelas setas.....	67
Figura 4.21	Pontos de solda com a presença de adesivos entre chapas, com um aumento de 50x. À esquerda o ponto de solda produzido com corrente constante e à direita o ponto de solda com corrente adaptativa. Presença de microporosidades - pontos pretos- exemplificados pelas setas. Poros discrepantes para a soldagem com corrente contínua.	67
Figura 4.22	Pontos de solda com a presença de adesivos entre chapas, com um aumento de 200x. À esquerda o ponto de solda produzido com corrente constante e à direita o ponto de solda com corrente adaptativa. Formação da martensita exemplificada pelas setas.....	68
Figura 4.23	Pontos de solda com a presença de resíduo metálico entre chapas, com um aumento de 50x. À esquerda o ponto de solda produzido com corrente constante e à direita o ponto de solda com corrente adaptativa. Presença de segunda fase destacada pela flecha.	69
Figura 4.24	Pontos de solda com a presença de resíduo metálico entre chapas, com um aumento de 200x. À esquerda o ponto de solda produzido com corrente constante e à direita o ponto de solda com corrente adaptativa. Formação da martensita exemplificada pelas setas.	69

Figura 4.25	Perfil de microdureza dos corpos de prova com GAP de 0,87mm entre as chapas.....	71
Figura 4.26	Perfil de microdureza dos corpos de prova com GAP 1,74mm entre as chapas.....	71
Figura 4.27	Perfil de microdureza dos corpos de prova com GAP de 2,61mm entre as chapas.....	71
Figura 4.28	Perfil de microdureza dos corpos de prova com GAP de 3,48mm entre as chapas.....	72
Figura 4.29	Perfil de microdureza dos corpos de prova com a presença de adesivo entre as chapas.	72
Figura 4.30	Perfil de microdureza dos corpos de prova com resíduo metálico entre as chapas.....	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Regiões do ponto de solda e suas características.	40
Tabela 3.1	Composição química (%) do aço CR-3 fornecida pela ArcelorMittal, análise de panela da corrida 3470437.	45
Tabela 3.2	Parâmetros de solda utilizados na soldagem dos corpos de prova, tanto para corrente constante, quanto para corrente adaptativa.	49
Tabela 3.3	Relação entre as regiões analisadas e a macroestrutura à qual pertencem no ponto de solda.	52
Tabela 4.1	Detalhes de picos e compensações em cada corpo de prova.	56
Tabela 4.2	Dimensões dos pontos de solda obtidos com o auxílio do software ImageJ. ...	61

LISTA DE ABREVIACOES E SÍMBOLOS

A1	Temperatura limite entre os campos ferrita-cementita e austenita-ferrita
A3	Temperatura limite entre o campo ferrita-austenita e a região austenítica
ARBL	Alta Resistência e Baixa Liga
d	Diâmetro
E	Energia elétrica
F	Força
GAP	Espaçamento entre chapas
HV	Dureza Vickers (<i>Vickers Hardness</i>)
i	Corrente elétrica
IF	Fratura interfacial (<i>Interfacial Fracture</i>)
I _p	Corrente elétrica no circuito primário
I _s	Corrente elétrica no circuito secundário
MAG	<i>Metal Active Gas</i>
PF	Falha por arrancamento (<i>Pullout Failure</i>)
PIF	Fratura interfacial parcial (<i>Partial Interfacial Fracture mode</i>)
PT-PP	Fratura de arrancamento e de espessura (<i>Partial Thickness–Partial Pullout</i>)
r	Resistência Elétrica

SCR	Retificador Controlado de Silício (<i>Silicon Controlled Rectifier</i>)
TF	Temperatura de Fusão
TR	Transformador de soldagem
ZF	Zona Fundida
ZAC	Zona Afetada pelo Calor

RESUMO

Dentre os processos de união de chapas metálicas para a estruturação de veículos, a solda ponto por resistência elétrica ainda pode ser considerada o processo mais utilizado, dada a sua facilidade de automação, alta produtividade e baixo custo associado. Para garantir a segurança do cliente, são necessárias inspeções com alta frequência de todos os pontos de solda produzidos. Mesmo com a utilização de equipamentos durante os testes, é preciso uma tomada de decisão de caráter humano para aprovação ou rejeição do ponto avaliado, abrindo espaço para erros durante as inspeções. A falta de sistemas de avaliação de pontos de solda à prova de erros aumenta o anseio das indústrias automobilísticas por equipamentos confiáveis e com garantia de soldas livres de defeitos. Desta maneira surgem os equipamentos com *feedback* adaptativo, que realizam correções durante a soldagem à partir de dados coletados a cada milissegundo do processo. O presente trabalho visa comparar o sistema convencional de solda a ponto com um sistema com *feedback* adaptativo, buscando definir a real eficiência deste novo modelo de equipamento quanto a não geração de defeitos bem como encontrar uma relação entre o surgimento de defeitos e as condições às quais se encontram as chapas no momento da união.

Palavras-chave: Solda a Ponto, Indústria automobilística, *Feedback* Adaptativo, Defeitos em Pontos de Solda, Variações no Processo de Soldagem a Ponto.

ABSTRACT

Between all the bonding methods for metal sheets in the structuring of vehicles, the resistance spot weld can still be considered the most used process due to its ease of automation, high productivity and low cost associated. To ensure customer safety, inspections are required with high frequency for all spot welds produced. Even with the use of equipment during testing is necessary a decision-making of human character for approval or rejection to the spot weld measured, opening space for errors during inspections. The lack of error proofing systems for spot welds checking, increases the desire of automotive industries for reliable equipment that guarantees defects free spot welds. Thus arise equipment with adaptive feedback, which can perform adjustments during welding from data collected in every millisecond of the process. The present study seeks to compare the conventional spot welding system to a system with adaptive feedback, looking to define the real efficiency of this type of equipment for the production of defects free joints. It also aims to evaluate the effects of variations in the process and find a relation between the defects formation and the conditions which are the sheets in the moment of the welding.

Keywords: Spot Welding, Automotive Industry, Adaptive Feedback, Defects in Spot Welds, Variations in the Spot Welding Process.

1 INTRODUÇÃO

Ao longo dos anos, a indústria automobilística tem sofrido grandes mudanças. Desde uma época em que o principal objetivo era apenas fabricar um veículo motor funcional para um período de *designs* audaciosos e inovações em termos de materiais. A cada dia os veículos se tornam mais leves, mais seguros e mais diferenciados entre si. Atualmente, não basta apenas produzir, é necessário conquistar o cliente. O mercado atual demanda automóveis com consumos de combustível atraentes, seguros, visuais inéditos e conforto para os ocupantes.

Em termos de estruturação veicular, produzir um automóvel com baixo consumo de combustível implica em uma carroceria leve, ou seja, estruturar o carro com chapas de espessuras reduzidas. Entretanto, a segurança do cliente vem em primeiro lugar. Logo, os materiais utilizados devem ser de alta resistência, mesmo em chapas de pequenas espessuras. Uma carroceria confortável para o cliente significa a ausência de ruídos metálicos e infiltrações.

Na estruturação de veículos, a união entre as chapas e peças metálicas pode ser realizada por diversos métodos. Podem ser utilizados processo de soldagem a ponto por resistência elétrica, união de peças com adesivos estruturais, soldagem a laser, soldagem por fricção, entre outros.

Para carros populares, deve-se obter veículos com a qualidade requerida pelo cliente e com preços competitivos no mercado. Quanto mais sofisticado o método de união de chapas, maior o valor agregado ao veículo. Sendo um processo de alta produtividade a soldagem a ponto por resistência elétrica ainda é o método com menor custo associado dentre os citados.

Em veículos de maior valor agregado a solda ponto vem perdendo espaço para a soldagem a laser, soldagem por fricção e adesivagem estrutural. Mesmo assim, a solda ponto tem uma grande importância na indústria automobilística, podendo ainda ser

considerada o principal processo de união de chapas em veículos pela sua facilidade de automação, alta produtividade e baixo custo associado.

Em um carro popular atualmente têm-se em média 5000 pontos de solda, cordões de solda MAG e adesivos estruturais. Cordões de MAG manuais são utilizados em regiões inacessíveis ao processo de soldagem a ponto por resistência automatizado e podem servir como indicador de eficiência de projeto. A utilização de adesivos estruturais é focada em regiões em que pontos de solda ficariam aparentes para o cliente e uniões de chapas com espaçamento excessivo entre as partes. Também são utilizados adesivos com funções de vedação e inibição de ruídos entre as chapas soldadas ou entre peças metálicas, durante a estruturação de carrocerias veiculares.

Para garantir estruturas seguras os pontos de solda são constantemente inspecionados em uma linha de produção, tanto por métodos destrutivos quanto por métodos não destrutivos. Os métodos destrutivos possuem alto custo agregado, uma vez que necessitam a destruição de uma carroceria para análise, horas de equipamento e mão-de-obra especializada.

O maior problema das inspeções em pontos de solda é a falta de sistemas à prova de erros, uma vez que todas as inspeções necessitam da aprovação humana, mesmo com a utilização de equipamentos. Sendo assim são realizadas inspeções com frequências acima do necessário para assegurar que os pontos de solda estejam conforme projeto.

Equipamentos capazes de evitar ou minimizar a formação de defeitos em pontos de solda são extremamente atrativos às indústrias, pois significam menor preocupação com as inspeções. Em função do custo elevado de implementação deste tipo de equipamento, estudos vem sendo conduzidos para avaliar a real eficácia quanto a não geração de defeitos.

O ponto de solda é sempre planejado para situações ideais: bom assentamento entre peças, ausência de óleo e outros contaminantes. Acredita-se que os sistemas convencionais de soldagem a ponto costumam gerar defeitos quando as peças a serem soldadas se encontram em uma situação diferente da qual a solda foi dimensionada. Nestas situações o sistema com *feedback* adaptativo indica ser capaz de não gerar defeitos.

O objetivo principal deste trabalho é avaliar a eficácia real de um equipamento com *feedback* adaptativo quando comparado com um equipamento tradicional utilizado para

soldagem a ponto de chapas da indústria automobilística, através de um comparativo metalúrgico de pontos de solda produzidos pelos dois equipamentos. O objetivo secundário do trabalho engloba estabelecer uma relação entre os defeitos encontrados na linha de produção e as variações de processo as quais uma manufatura de automóveis está suscetível.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Aços na indústria automobilística ou automobilística?

Buscando sempre veículos mais leves, mais seguros, com menor emissão de poluentes e com *designs* inovadores para conquistar o cliente, a indústria automobilística tem promovido enormes avanços na metalurgia dos aços ao longo das últimas décadas, conforme pode ser observado na figura 2.1. Os automóveis de tempos passados possuíam aspecto "quadrado", basicamente em função da estampabilidade inadequada das chapas de aço ferrítico-perlítico utilizadas antigamente, reflexo das limitações de processos industriais de refino e de conformação da época.

Sabe-se que a ductilidade das microestruturas ferrítico-perlíticas, é reduzida pela presença de perlita e elementos de liga em solução sólida. Por exigência da indústria automobilística as usinas siderúrgicas evoluíram tecnologicamente para produzir aços baratos, resistentes e com alta estampabilidade [Gorni, 2008].

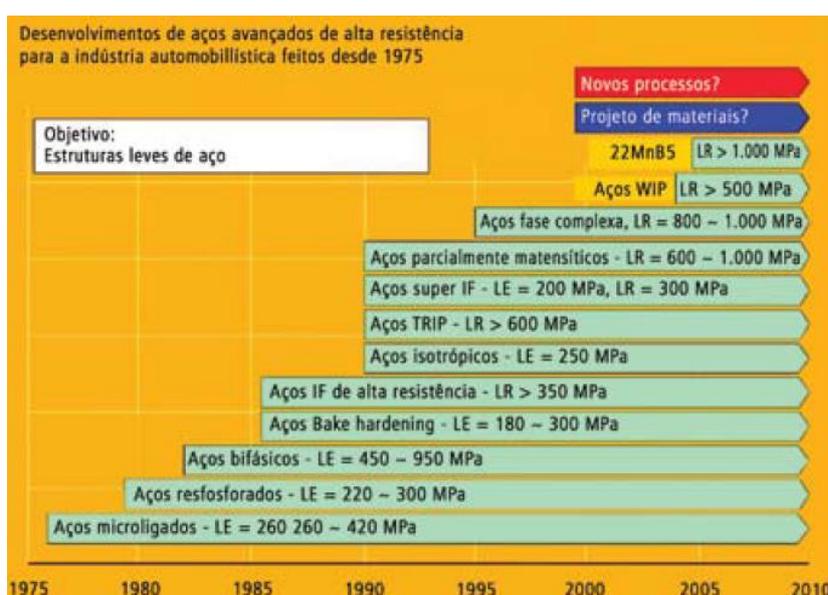


Figura 2.1 Evolução dos diversos tipos de aço de alta resistência ao longo das últimas décadas [Gorni, 2008].

Com o avanço das ligas de alumínio e polímeros reforçados, o aço vem cedendo espaço e participação no peso dos automóveis. Para garantir seu mercado a indústria siderúrgica começou a modificar a composição química dos aços voltados para a indústria automobilística: reduziu progressivamente o teor de carbono e adicionou elementos de liga tais como titânio, molibdênio, cromo, nióbio, alumínio e vanádio para produzir aços com alta resistência, elevada soldabilidade e consideráveis níveis de ductilidade e tenacidade. Surgiram, assim, os aços de Alta Resistência e Baixa Liga (ARBL) no intuito de frear o avanço de seus concorrentes [Perini, 2008].

A grande maioria das partes que compõem uma carroceria automobilística e que colaboram no aumento da segurança e no alto desempenho são feitas de aços especiais de alta resistência, como exemplificado na figura 2.2.



Figura 2.2 Ilustração gráfica de diferentes tipos de aço utilizados em um veículo de passageiros. As cores refletem a resistência do aço. Fonte: <http://www.cbmm.com.br/br/p/53/acos-automotivos-.aspx> visitado em 06/02/2016.

Os estudos sobre os efeitos de micro adições de vanádio, titânio e nióbio nas propriedades mecânicas de aços de baixo carbono começaram no final da década de 50 [Gorni, 2008]. A partir destes estudos, desenvolveram-se tratamentos termomecânicos que, por sua vez, levaram à obtenção de aços que apresentam microestrutura com alto grau de refino. Com a redução no tamanho de grão foi possível aumentar, simultaneamente, a resistência mecânica e a tenacidade das chapas produzidas. Também tornou-se praticável a diminuição dos teores de elementos de liga do aço, especialmente do carbono. Para chapas da indústria automobilística, estes resultados trouxeram produtos com melhor soldabilidade e, conseqüentemente, redução de custos para a fabricação das estruturas. Além do refino de grão, os elementos de micro liga também podem proporcionar endurecimento por

precipitação interfásica de partículas extremamente finas, aumentando a resistência mecânica do material.

No caso de aços laminados a frio, os elementos de micro liga retardam os processos de recristalização e crescimento de grão que ocorrem durante o recozimento das bobinas. Esses elementos, tanto na forma solubilizada como na precipitada, possuem a capacidade de restringir a recristalização da austenita entre os passes de laminação abaixo de uma determinada temperatura, entre 900°C e 1.000°C. Dessa forma, durante a fase de acabamento da laminação, produz-se grãos de austenita completamente achatados imediatamente antes de sua transformação, proporcionando inúmeros pontos propícios para a nucleação de ferrita durante o resfriamento. Dessa forma, obtém-se uma microestrutura ferrítica intensamente refinada, possibilitando ao aço as características mecânicas desejadas para a indústria automobilística [Gorni, 2008].

2.2 Estruturação de carrocerias

Atualmente, na estruturação de uma carroceria de automóvel popular, as peças metálicas podem ser unidas por pontos de solda, adesivos estruturais e cordões de solda MAG. Cada método de união é utilizado em regiões específicas, de maneira a tornar o processo rápido, robusto e com menor custo associado. Pontos de solda são aplicados em praticamente 100% da carroceria, cordões de solda MAG manuais são utilizados em regiões inacessíveis ao processo de soldagem a ponto por resistência automatizado e a adesivagem tem como principal aplicação o fechamento externo do veículo, onde pontos de solda ficariam aparentes ao cliente, ou regiões com espaçamento excessivo entre as peças unidas.

Em veículos de maior valor agregado a solda ponto vem perdendo espaço para a soldagem a laser, soldagem por fricção e adesivagem estrutural. Mesmo assim, a solda ponto tem uma grande importância na indústria automobilística, podendo ainda ser considerada o principal processo de união de chapas em veículos pela sua facilidade de automação, alta produtividade e baixo custo associado.

2.2.1 Principais componentes de um equipamento de soldagem a ponto por resistência elétrica

Conforme ilustrado na figura 2.3, um equipamento de soldagem por resistência elétrica é composto pelos seguintes componentes [Pinheiro, 2010]:

- Transformador de soldagem (TR);
- Retificador Controlado de Silício, (Silicon Controlled Rectifier, SCR);
- Controlador de soldagem;
- Pinça de soldagem.

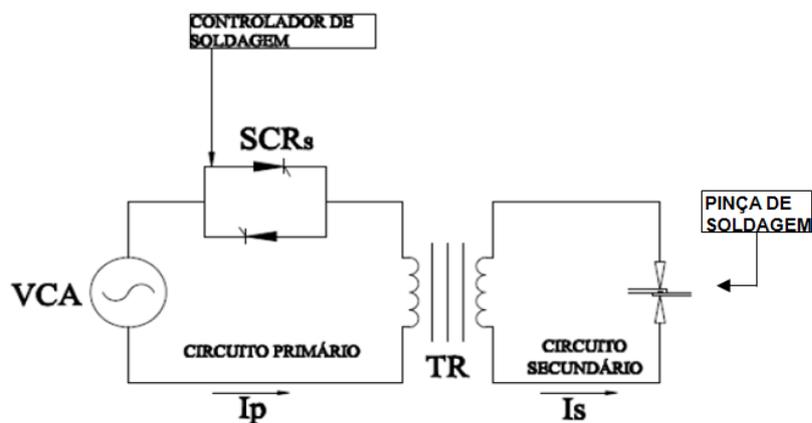


Figura 2.3 Representação esquemática dos principais componentes de um equipamento de soldagem por resistência elétrica [Pinheiro, 2010].

O transformador de solda é responsável pela redução de tensão e aumento da corrente, conforme solicitado pelo controlador de soldagem. O Retificador Controlado de Silício é responsável por energizar o transformador, conforme solicitado pelo controlador de soldagem; o controlador é onde estão conectados todos os sinais de acionamentos e sinais de saídas do equipamento [Pinheiro, 2010], através dele são definidos os parâmetros que serão utilizados, como corrente elétrica, força de fechamento entre os eletrodos, tempo de solda, etc. A pinça de soldagem realiza o fechamento dos eletrodos conforme a força estabelecida no controlador de soldagem.

2.2.2 Processo de soldagem a ponto por resistência elétrica

A soldagem à ponto vem sendo melhorada e otimizada com os avanços da tecnologia; anteriormente realizada por operadores humanos com ponteadeiras manuais,

hoje em dia é indispensável que a soldagem seja robotizada. Desta maneira têm-se um processo robusto tanto em produtividade, reprodutibilidade e qualidade dos pontos realizados quanto ao número correto de pontos de solda por operação.

A soldagem a ponto por resistência ocorre quando existe a passagem de corrente elétrica de alta intensidade -na ordem de kA- entre chapas metálicas. A corrente é transmitida para as chapas através de eletrodos; estes eletrodos também são responsáveis por manter as chapas envolvidas o mais próximo possível - através de acionamentos mecânicos, hidráulicos ou pneumáticos - e por um período de tempo, para garantir que as chapas fiquem na posição correta durante a fusão e a solidificação. O procedimento de soldagem a ponto é esquematizado na figura 2.4.

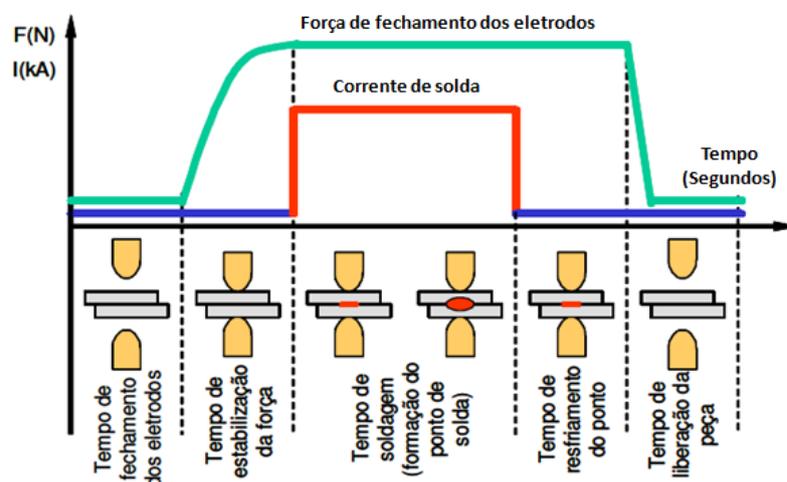


Figura 2.4 Esquematização do processo de soldagem a ponto [Batista, 2011].

A força é aplicada antes da circulação de corrente, para estabilizar a compressão entre as chapas - tempo de pré-pressão- e, após o período de soldagem, as chapas são mantidas unidas com a força de fechamento dos eletrodos durante o resfriamento - tempo de pós-pressão-.

A força entre os eletrodos assegura o perfeito contato entre as peças e evita a formação de trincas devido aos esforços provocados pela contração de solidificação da lentilha de solda durante o resfriamento [Stocco, 2010]. A força de fechamento quando bem dimensionada evita projeções de material do ponto garantindo a qualidade da solda. Um aumento na pressão de fechamento causa uma diminuição da resistência das interfaces e do calor; desse modo, a corrente elétrica ou tempo devem ser aumentados para compensar a queda da resistência [Batista, 2011].

O fenômeno da soldagem se dá por efeito Joule (equação 2.1), a partir do qual sabe-se a quantidade de calor gerado a partir da resistência elétrica do componente e da corrente aplicada.

$$E = \int_0^t r(t) i^2(t) dt \quad (2.1)$$

Onde,

E = energia elétrica transformada em calor.

r = resistência elétrica do componente.

i = corrente elétrica.

t = tempo em que a corrente circulou pelo componente.

O circuito elétrico envolvido na soldagem a ponto por resistência elétrica é formado pelo secundário do transformador da máquina de solda, pelos braços de soldagem, pelos eletrodos e pelas partes a serem soldadas [Sampaio, 2010]. Um desenho esquemático do circuito elétrico é representado na figura 2.5.

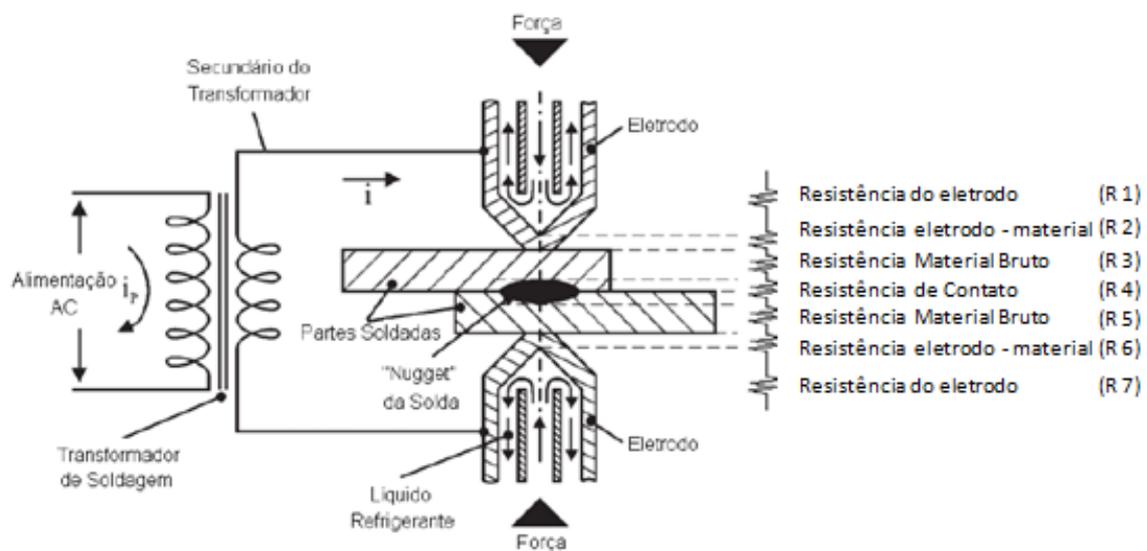


Figura 2.5 Representação do processo de soldagem a ponto por resistência elétrica para união de duas chapas. [Sampaio, 2010, modificado].

Pelo efeito Joule sabe-se que na região de maior resistência a quantidade de calor gerado será máxima. Pela Figura 2.5 pode-se estabelecer 7 resistências elétricas associadas em série, para a união de duas chapas, são elas:

- R 1 - Resistência eletrodo superior.
- R 2 - Resistência entre o eletrodo superior e a chapa superior.
- R 3 - Resistência da chapa superior.
- R 4 - Resistência de contato entre as duas chapas metálicas.
- R 5 - Resistência da chapa inferior.
- R 6 - Resistência entre o eletrodo inferior e chapa inferior.
- R 7 - Resistência do eletrodo inferior.

Os eletrodos são fabricados com material de baixa resistência elétrica e que se adaptam facilmente às superfícies das chapas, garantindo um bom assentamento na interface eletrodo-chapa. Estes dois fatores fazem com que as resistências R 1, R 2, R 6 e R 7 seja minimizadas e que pouca quantidade de calor seja gerada nestas regiões. A grande maioria dos eletrodos é fabricada com ligas a base de cobre [Nascimento, 2008]. Além disso, os eletrodos são constantemente refrigerados, através da circulação de água de refrigeração na pinça de solda.

As maiores resistências envolvidas no circuito são R 3, R 4 e R 5, sendo R 3 e R 5 determinadas pela composição química e propriedades elétricas do material à ser soldado. A resistência entre as chapas, R 4, é a maior resistência do circuito, logo é nesta interface que se terá a maior temperatura e, conseqüentemente, onde se formará o ponto de solda. A distribuição de temperaturas nos componentes do circuito é representada na figura 2.6.

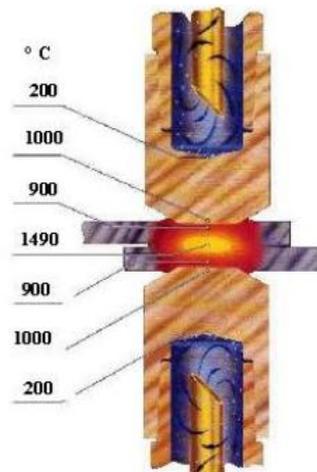


Figura 2.6 Distribuição de temperaturas nos componentes do circuito elétrico [Stocco e Gonçalves, 2003].

Durante a soldagem a resistência R 4 não permanece constante, em função das transformações físicas envolvidas na rápida fusão do material. Dá-se o nome de resistência

estática ao valor inicial de R 4 e resistência dinâmica ao comportamento de R 4 ao longo do tempo durante a soldagem [Furlanetto, 2014].

2.2.3 Resistência dinâmica

Dá-se o nome de resistência dinâmica à variação da resistência elétrica de contato na interface das chapas durante o período de soldagem. A curva de resistência dinâmica é função do tempo de soldagem, da força do eletrodo, da corrente de soldagem e das propriedades físicas dos materiais envolvidos na união [Batista, 2011]. Esta curva pode ser utilizada como uma forma de medir a qualidade da solda de maneira não destrutiva e em tempo real [Amaral, 2011]. Na figura 2.7 é apresentada uma curva característica de resistência dinâmica.

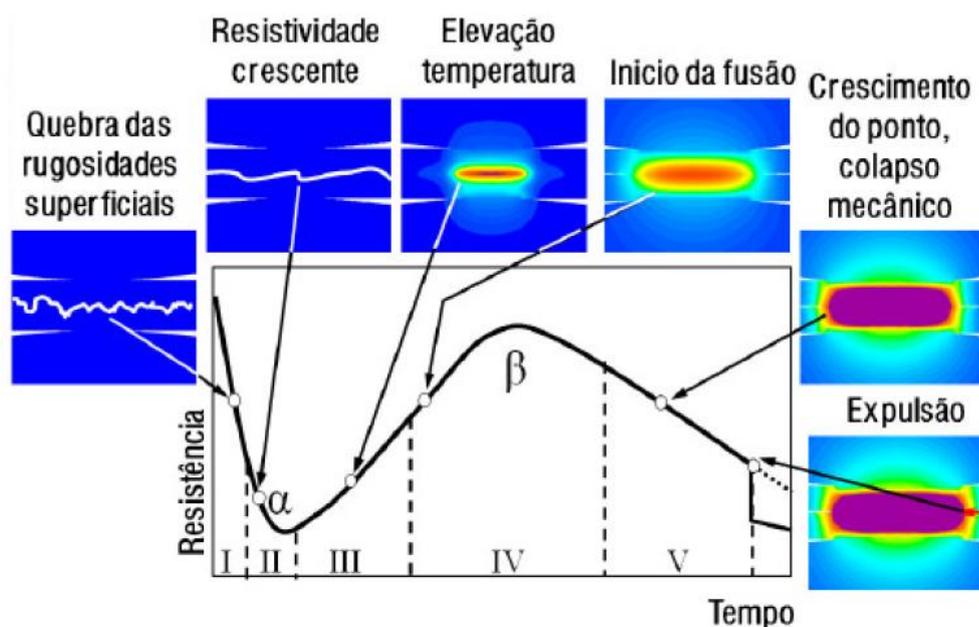


Figura 2.7 Esquema dos principais estágios da resistência dinâmica durante a formação do ponto de solda [Batista, 2011].

Na primeira região da curva, observa-se uma redução no valor absoluto da resistência. Este comportamento está associado à quebra de rugosidades superficiais e eliminação de óxidos e contaminantes superficiais (óleos). Este comportamento da curva se mantém até chegar em um ponto mínimo - contato metal-metal-.

Na segunda região da curva, atinge-se o ponto mínimo, onde se obtém um bom contato físico entre as partes à serem unidas - contato metal-metal - Nesta etapa ocorre o aquecimento concentrado na interface das chapas. A área de contato aumenta, reduzindo a resistência, por outro lado a resistividade aumenta com o aumento da temperatura. Quando a influência da resistividade supera a da área de contato, inicia-se a subida da curva de resistência dinâmica [Batista, 2011].

Na terceira região, ocorre um acréscimo da resistência associado ao aumento da resistência do material devido ao seu aquecimento. No quarto estágio, ocorre a fusão do material.

No quinto estágio, o calor gerado pelo crescimento do ponto causa um afastamento entre as pontas dos eletrodos e à medida que o ponto de solda expande, a resistência dinâmica passa a cair novamente [Amaral, 2011]. Se houver energia demasiada no quinto estágio, ocorre a expulsão de material fundido e, com este fenômeno a resistência dinâmica sofre uma queda abrupta [Furlanetto, 2014].

2.2.4 Variações de processo

Em uma linha de produção de automóveis existem variações de processo que muitas vezes não são consideradas e que influenciam na soldagem a ponto. Cada ponto de solda realizado no veículo é dimensionado para situações ideais: chapas bem assentadas uma sobre a outra, sem impurezas e/ou resíduos nas superfícies e entre as chapas, etc. Qualquer situação que não a ideal ao qual o ponto foi dimensionado com os parâmetros de corrente, força de fechamento e tempo de solda, pode afetar a resistência dinâmica e, conseqüentemente, a qualidade do ponto.

Na estruturação de carrocerias é comum que os dispositivos de fixação das peças para a realização da solda permitam folgas/espaçamentos entre as chapas [Furlanetto, 2014]. Estes espaçamentos, popularmente chamados de GAP's, podem afetar a área de contato entre os eletrodos e influenciar a resistência dinâmica, uma vez que, na interface entre as chapas haverá uma quantidade maior de ar durante a fusão e, com a necessidade do fechamento ser realizado pelas pinças do robô, ocorre alteração na área de contato metal-eletrodo.

Outra variável de processo importante na indústria automobilística é a presença de adesivos selantes entre as chapas que serão soldadas [Furlanetto, 2014]. Estes adesivos têm o objetivo de suportar a calafetação realizada para vedar a estrutura para infiltrações de água, além de auxiliar o fechamento do veículo para a entrada de gases e poeira.

Os pontos de solda que são projetados para soldar sobre filetes de adesivos já são dimensionados para tal, com valores propícios de corrente e tempo de solda. Entretanto cordões de adesivos, em aplicações manuais, podem ser aplicados em regiões maiores do que o projetado, se não houver gabaritos específicos para as aplicações.

Assim, é possível que existam pontos de solda sem o dimensionamento ideal para a soldagem contendo massas adesivas entre as chapas. Esta variação de processo gera alterações na resistência dinâmica do ponto e pode produzir pontos sem a especificação necessária, além da possibilidade de descontinuidades internas, falta de fusão e outros defeitos.

Outra possibilidade na estruturação de carrocerias é a presença de poeira/partículas metálicas sobre as superfícies. Uma vez que existem retrabalhos de caroços e amassados em uma linha de produção, podem haver resíduos depositados sobre chapas que serão soldadas posteriormente. Logo, se houver o fechamento de uma chapa adjacente em uma superfície com deposição de material particulado, este material influenciará o processo de soldagem, uma vez que, o particulado retira o ponto das condições ideais, ao qual ele foi dimensionado. Assim, a presença de material de retrabalho aderido entre chapas metálicas também pode vir a influenciar na resistência dinâmica.

2.2.5 Defeitos em pontos de solda

Os defeitos possíveis em um ponto de solda estão relacionados aos valores estabelecidos no controlador de solda (força de fechamento, corrente e tempo de solda), situação dos eletrodos (alinhamento, área em contato com as chapas, limpeza) e a condições físicas das chapas - impurezas, espaçamentos excessivos, óleos, etc. Os principais defeitos encontrados em pontos de solda são:

- **Expulsão:** segundo estudos anteriores [Salem, 2011] este defeito é o principal indicador de qualidade de solda. A expulsão é caracterizada pela perda de material fundido na forma de faíscas.

Este defeito ocorre quando as forças internas no material fundido superam a força de fechamento dos eletrodos e é associado à pequena força de fechamento dos eletrodos, tempo de pós-pressão muito curto, corrente de soldagem muito alta, tempo excessivo de soldagem [Rossi, 2007], além de poder ser ocasionadas por desalinhamento de eletrodos e variações de processo - GAP's entre chapas, presença de adesivos e resíduos metálicos.

A Expulsão implica na perda de material que deveria estar no núcleo fundido - causa perda de resistência, surgimento de porosidades internas e, se o material expulso do ponto ficar retido entre as chapas, situação ilustrada na figura 2.8, pode causar ruídos inconvenientes ao cliente quando houver a movimentação da carroceria, gerando a necessidade de retrabalhos.

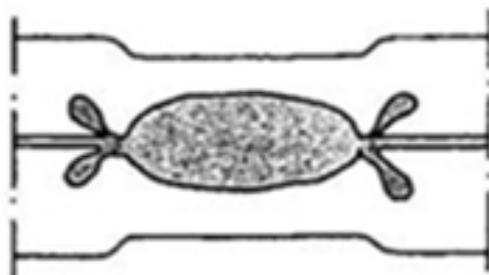


Figura 2.8 Expulsão de material líquido entre chapas. Uma das principais maneiras de geração de ruído de carrocerias em serviço [Rossi, 2007].

- **Ponto Solto:** também chamando de solda fria e ponto sem fusão. Este defeito se caracteriza pela falta de fusão entre as chapas, ou seja, não há formação da lentilha de solda. O ponto solto é associado [Stocco, 2010] a uma força excessiva de fechamento dos eletrodos, ou pequeno tempo de aplicação de corrente, corrente insuficiente de solda aplicada e eletrodo com pouco fresamento (condição de alargamento da ponteira do eletrodo).

A ocorrência de pontos soltos também pode ser associada às variações de processo, como espaçamento entre chapas gerado pelos dispositivos de montagem, presença de

resíduos metálicos e adesivos entre chapas. A figura 2.9 ilustra a falta de fusão decorrente de tempo reduzido de aplicação de corrente.

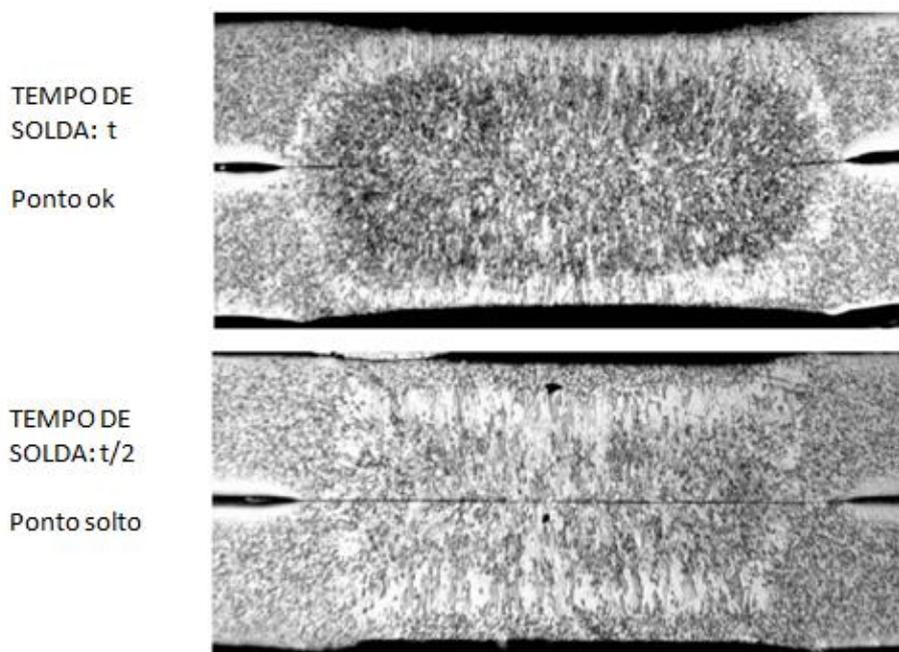


Figura 2.9 Comparativo entre dois pontos, um com a formação normal da lentilha de solda e outro com a má formação - ponto solto- decorrente de tempo insuficiente de aplicação de corrente [Batista, 2011, modificado].

A figura 2.9 também ilustra a presença de pequenos poros que se formam com tempo reduzido de soldagem.

- **Lentilha pequena:** neste defeito ocorre a fusão entre as chapas, entretanto o ponto formado possui um diâmetro menor que o aceitável, tornando o ponto discrepante [Salem, 2011]. A ocorrência deste defeito está associada à corrente de soldagem muito baixa, tempo de soldagem muito curto, eletrodos com pouco fresamento e força de fechamento excessiva [Rossi, 2007] [Stocco, 2010].

A ocorrência de pontos com lentilhas pequenas também pode ser associada às variações de processo, como espaçamento entre chapas gerado pelos dispositivos de montagem, presença de resíduos metálicos e adesivos entre chapas.

- **Porosidades:** a presença de porosidades no interior do ponto de solda pode facilitar a nucleação de trincas e diminuir a vida útil da estrutura. As porosidades podem ser geradas por diversos fatores, entre eles por expulsões de material fundido durante o processo de fusão, materiais voláteis na interface entre chapas que com o aquecimento da

região vaporizam e deixam vazios no centro do ponto durante a solidificação [Stocco, 2010] e tempo reduzido de soldagem.

O aprisionamento de materiais voláteis entre as chapas é facilitado por espaçamentos entre as partes a serem soldadas e tempo de pré-pressão insuficiente. A queima de adesivos e a fusão de partículas metálicas entre as chapas também podem gerar poros no interior do ponto.

Para que o ponto com a presença de porosidades não seja discrepante é necessário que [Furlanetto, 2014]:

- Todas as porosidades estejam na região fundida e distantes da Zona Afetada pelo Calor (ZAC);
- A soma da área de poros seja inferior a 15% da área do ponto;
- A soma do comprimento de todos os poros seja inferior a 25% do diâmetro do ponto;

Um comparativo entre porosidade discrepante e porosidade não discrepante, em relação às dimensões do defeito, é apresentado na figura 2.10. Em (a) temos uma porosidade não discrepante enquanto em (b) uma porosidade discrepante.

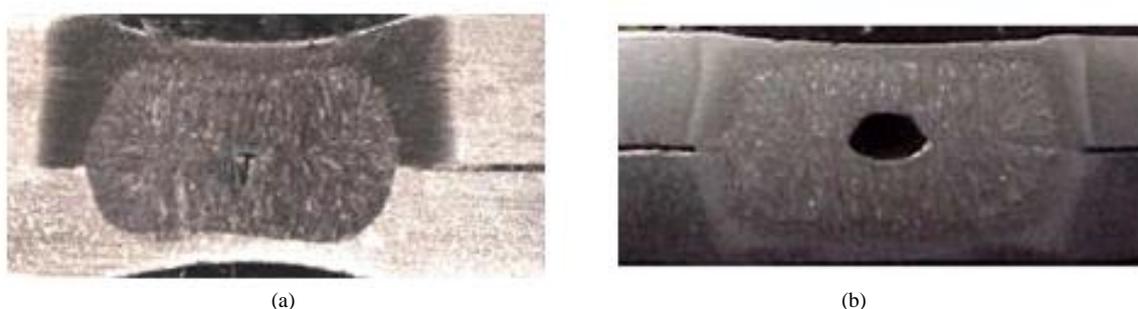


Figura 2.10 Comparativo entre macroporosidades. Em (a) macroporosidade pequena - não discrepante [Nascimento, 2008] em (b) macroporosidade grande - discrepante [Stocco e Gonçalves, 2003].

2.2.6 *Feedback adaptativo*

Um sistema convencional de soldagem a ponto por resistência elétrica se baseia na passagem de corrente de forma contínua ao longo do tempo, isto é, durante todo o tempo de soldagem o equipamento aplica sempre a mesma corrente.

Sabe-se que a resistência dinâmica não é constante durante o período de formação de lentilha de solda, sendo assim, a corrente aplicada também não deveria ser constante. A corrente deveria ser ajustada, conforme a variação da resistência dinâmica para assegurar um botão de solda sem expulsões (perdas de material), trincas, porosidades e com dimensões ideais de diâmetro e penetração. Estudos anteriores [Amaral, 2011] [Chen, 2005] [Chertov, 2007] [Sampaio, 2010] [ZHOU, 2012] [Zeng, 2004] avaliaram a possibilidade de controle em tempo real e ajuste de parâmetros com feedback adaptativo.

Já existem equipamentos/módulos que executam justamente a adaptação de corrente descrita acima: a cada momento da solda a resistência dinâmica é medida e o equipamento executa compensações na corrente e/ou no tempo de soldagem para produzir um ponto com menor probabilidade de defeitos. Podemos chamar a corrente aplicada por estes equipamentos/módulos de corrente adaptativa.

2.3 Qualidade de pontos de solda na indústria automobilística

A resistência de um ponto de solda está intimamente relacionada às propriedades físicas e mecânicas do material, da região fundida e da zona afetada pelo calor [Batista, 2011]. Sendo assim, é fundamental que o ponto tenha dimensões corretas e uma ZAC de extensão adequada, além disso, rebarbas, respingos e indentação excessiva são fatores indesejáveis, pois afetam as propriedades mecânicas do ponto.

Para garantir a qualidade dos pontos de solda em um processo de manufatura enxuta, cada indústria e empresa define seus procedimentos de acordo com as necessidades do processo. Geralmente são realizadas inspeções com ensaios não destrutivos e ensaios destrutivos. Os ensaios não destrutivos são realizados, normalmente, no dia-a-dia do chão de fábrica, para garantir a qualidade dos pontos de solda, sem afetar a produção. Já os ensaios destrutivos ocorrem com uma frequência menor, uma vez que envolvem a destruição de uma carroceria inteira, logo possuem um custo elevado.

A qualidade dos pontos de solda é suscetível a erro humano: falhas operacionais, não seguimento de procedimentos, etc. Um sistema adaptativo de soldagem a ponto que torne o processo robusto, reduzindo a geração de defeitos, tem menor suscetibilidade a erros humanos, uma vez que o equipamento garante uma solda de melhor qualidade.

2.3.1 Ensaaios não destrutivos

Usualmente na indústria automobilística os ensaios não destrutivos mais utilizados são a verificação por ultrassom e testes com talhadeira e martelo associado à verificação visual.

No teste com ultrassom o operador qualifica o ponto de solda como aprovado ou não aprovado com o auxílio de um equipamento. Atualmente existem equipamentos de ultrassom matriciais específicos para a verificação de pontos de solda, que fornecem imagens de fácil interpretação pelo operador. Estes equipamentos permitem determinar profundidade de indentação e diâmetro do ponto, bem como defeitos internos grandes (má formação da lentilha de solda, macroporosidades, etc.). Entretanto, este método não possui os mesmos níveis de confiabilidade e precisão que os métodos destrutivos [Nasir, Pandey e Khan, 2016].

O teste com talhadeira e martelo visa garantir que houve fusão no ponto de solda inspecionado. Este método se baseia na inserção de uma talhadeira entre as chapas soldadas, em uma região próxima ao botão de solda, e então é realizado o martelamento da talhadeira com o objetivo de tentar destacar o ponto. A técnica deste ensaio é representada na figura 2.11.

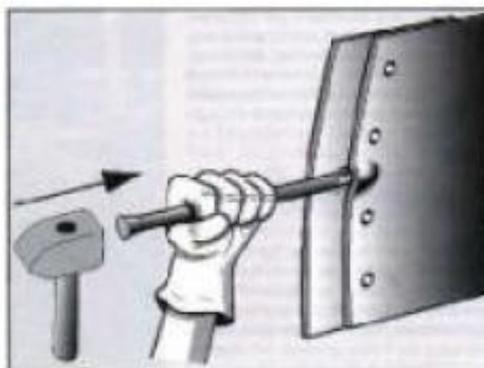


Figura 2.11 Representação do posicionamento da talhadeira entre as chapas no teste com talhadeira e martelo [Stocco e Gonçalves, 2003].

Se houver o destacamento do ponto, significa que não houve fusão efetiva da região e imediatamente é aberto o rastreamento de linha para avaliação das unidades produzidas anteriormente verificando se estas possuem o mesmo defeito. Todos os pontos de solda com solda fria devem ser reparados. Se não houver o destacamento do ponto durante o

teste, significa que a fusão ocorreu conforme planejado; para realizar o fechamento das chapas após o teste utiliza-se a extremidade plana na região oposta da talhadeira.

Este teste de verificação possui uma frequência estabelecida a partir de dados industriais. No momento do teste a unidade testada anteriormente e que não tenha apresentado defeitos, ainda não deve ter avançado no processo a ponto do rastreamento atingir a próxima área produtiva, no caso da indústria automobilística este processo seria o de pintura.

O teste com talhadeira e martelo é associado a uma inspeção visual realizada pelo operador para identificar defeitos visíveis e que podem prejudicar as propriedades mecânicas nos pontos de solda, tais como rebarbas e respingos (expulsão de material), alta indentação, trincas na superfície do ponto, etc.

2.3.2 Ensaio destrutivo

O ensaio destrutivo tem como objetivo a verificação de todos os pontos de solda de uma estrutura soldada, assim como avaliar as propriedades destes pontos. Para isto são realizados testes padrões como teste de arrancamento, ensaio de tração (cisalhamento) e ensaios metalográficos.

Estes ensaios são custosos, pois perde-se uma carroceria inteira para as análises, além do fato de que o tempo necessário para preparação de amostras, realização de ensaios e interpretação de resultados exigem equipamentos e horas de mão-de-obra qualificada.

Teste de arrancamento

Este teste é muito similar ao teste de talhadeira e martelo, mas enquanto o teste com talhadeira e martelo busca a conferência da fusão no ponto de solda o teste de arrancamento verifica a ocorrência de fusão e o diâmetro do ponto de solda. Após a estruturação da carroceria, os pontos a serem analisados são destacados com a utilização de alicates. Após o arrancamento é realizada a medição de diâmetro.

Trata-se de um teste simples e de fácil execução, mas que envolve a destruição de uma carroceria para a verificação de apenas uma característica. Não são verificados defeitos internos, penetração e nem é medida a resistência do ponto ao arrancamento.

Ensaio de tração (cisalhamento)

Este ensaio simula a situação de esforço aos quais os pontos de solda de uma carroceria de automóvel são submetidos e, a partir dele, pode-se avaliar o modo de falha do ponto bem como a sua resistência máxima.

Segundo [Pouranvari, Marashi e Mousavizadeh, 2010] existem, basicamente, 4 maneiras que um ponto de solda poder falhar, ilustrados na figura 2.12:

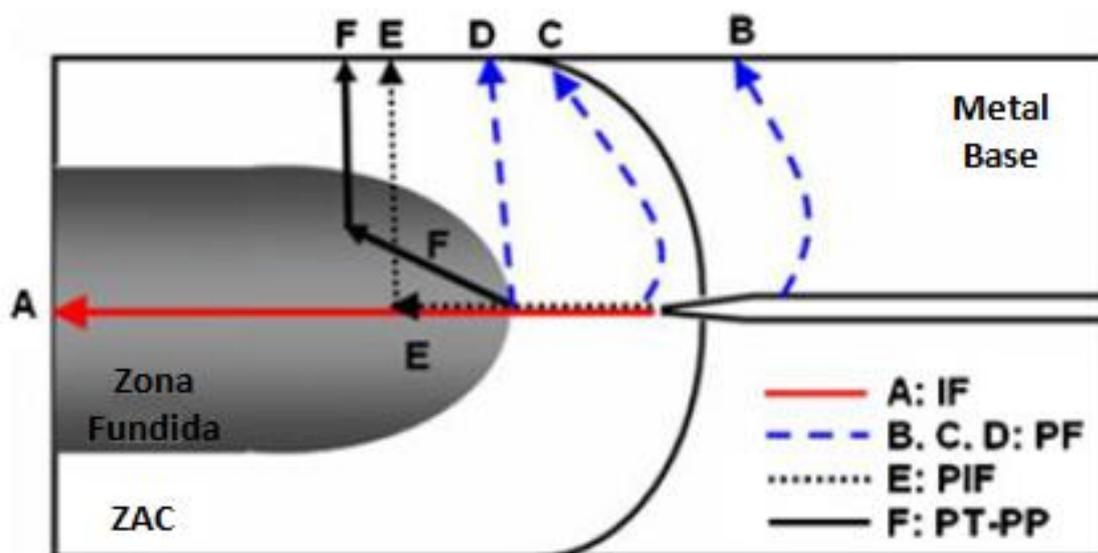


Figura 2.12 Caminhos de propagação de trinca envolvidos em cada modo de falha [Pouranvari, Marashi e Mousavizadeh, 2010].

- Fratura interfacial (IF) - propagação de trinca pela zona fundida (caminho A). Este modo de falha proporciona um efeito prejudicial no caso de colisões de veículos. [Pouranvari et al., 2008] Pontos com baixa dureza na zona fundida e com porosidades tem suas chances de falha por fratura interfacial aumentadas.

- Falha de arrancamento (PF) - botão de solda se desprende de uma das chapas. Este modo de falha ocorre com a propagação de uma trinca que inicia no metal base (caminho B), ou na ZAC (caminho C) ou na interface ZAC- Zona fundida (caminho

D). Os pontos de solda com este modo de falha apresentam as melhores propriedades mecânicas.

- Fratura interfacial parcial (PIF) - Início da trinca ocorre na ZAC, propaga até alguma região da zona fundida, após a propagação ocorre em direção à borda da chapa, atravessando toda a espessura (caminho E).
- Fratura de arrancamento e de espessura (PT- PP) - neste modo de falha a trinca inicia na interface da ZAC e da região fundida, a trinca propaga pela espessura e ocorre o arrancamento parcial do ponto.

Nas figuras 2.13A e 2.13B tem-se um modo de falha envolvendo o rompimento do metal base, este resultado é indesejável no ensaio de tração, pois não é possível avaliar quantitativamente a resistência da solda. Nas figuras 2.13C, 2.13D e 2.13E são observados os modos de falha por destacamento do ponto, do rasgamento do material base em torno do ponto e pela falha na interface, respectivamente [Zhou, Hu e Zhang, 1999]. Normalmente, para que a falha do ponto de solda não ocorra no metal base, o ponto deve ter um diâmetro de cerca de 4 vezes a raiz do valor da espessura da chapa mais fina [Amaral, 2011].

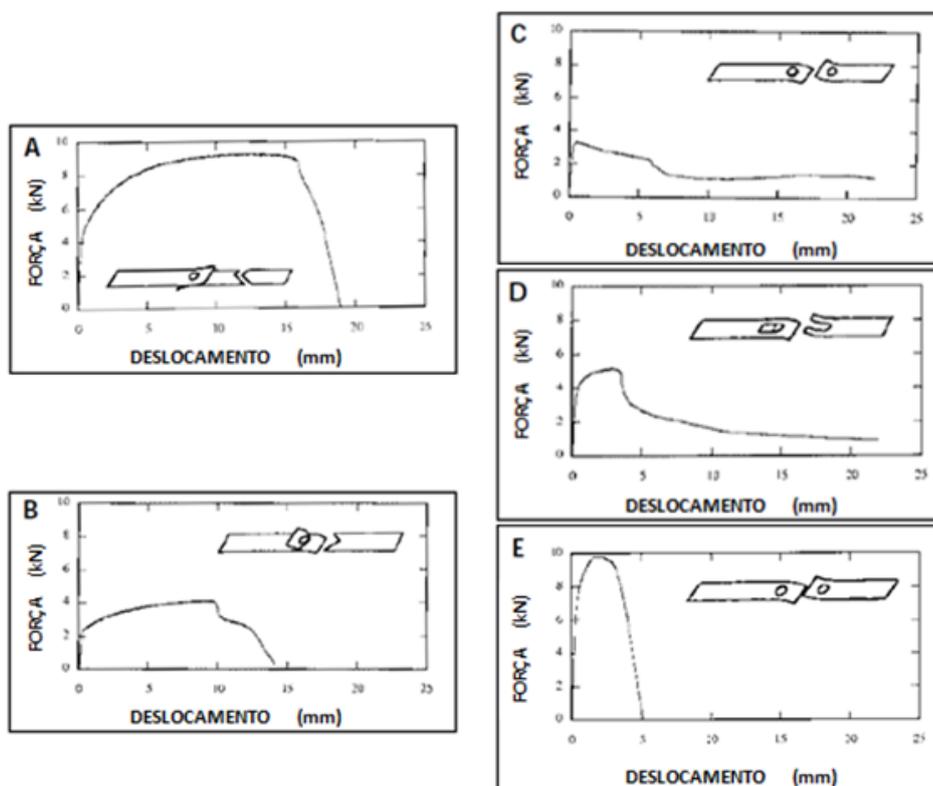


Figura 2.13 Curvas típicas de carregamento vs. Deslocamento com os correspondentes modos de falha em testes de tração [Zhou, Hu e Zhang, 1999].

Segundo [Zhou, Hu e Zhang, 1999], o modo de falha apresentado na figura 2.13C está relacionado a um ponto de solda com dimensões pequenas, o modo de falha da figura 2.13D é relativo a uma fratura que inicia na interface entre ponto e chapa, associados a pontos com alta indentação ou ZAC com baixa dureza e no modo de falha apresentado na figura 2.13E a ruptura ocorreu com o destacamento do ponto de solda.

[Batista, 2011] relaciona a resistência de um ponto de solda em ensaio de tração com a dureza da região fundida e da ZAC. Seu estudo indica que valores maiores de dureza do núcleo do ponto e, principalmente, da zona afetada pelo calor resultam em melhores desempenhos em ensaios de tração.

Ensaio metalográficos

Esta série de ensaios traz informações a respeito das alterações que ocorrem no material em função da formação da lentilha de solda. São, geralmente, avaliadas a macrografia do ponto, a micrografia e o perfil de dureza.

A macrografia indica as dimensões da zona fundida e da zona afetada pelo calor, bem como a presença de porosidades, trincas e outros defeitos. A macrografia típica de um ponto de solda é representada na figura 2.14, onde é possível visualizar os atributos geométricos do ponto. O diâmetro do botão de solda, a penetração e a largura da ZAC são dimensões fundamentais para a resistência do ponto.

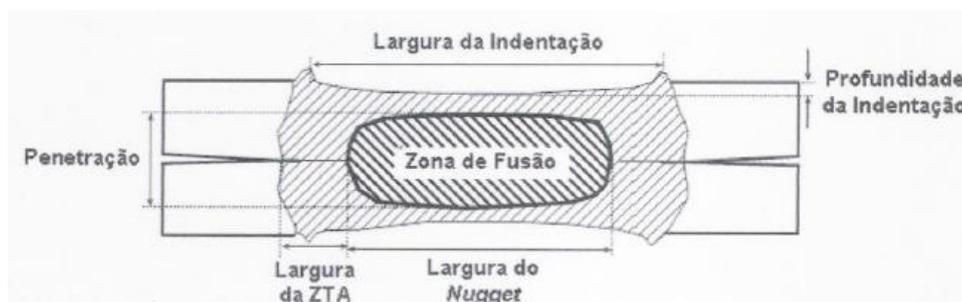


Figura 2.14 Macrografia típica de ponto de solda [Pinheiro,2010].

A penetração mínima aceitável é de 20% em cada chapa [Furlanetto, 2014], enquanto o diâmetro do ponto, na falta de um critério específico, deve se situar de 3 a 4 vezes o valor da chapa de menor espessura [Rossi, 2007].

A zona afetada pelo calor (ZAC) é a interface entre o metal base e a região onde ocorre a formação do ponto de solda (zona fundida) e é caracterizada por grãos colunares. Ela separa uma estrutura bruta de fusão (botão de solda) e o metal base sem alterações na estrutura cristalina [Furlanetto, 2014].

Na micrografia é possível visualizar pequenos defeitos, que não são perceptíveis com a macrografia. Além de ser possível identificar as microestruturas envolvidas no ponto de solda.

Pelo diagrama da figura 2.15 pode-se identificar as temperaturas de transformação mais importantes para aços de baixo carbono. Sabe-se [Kwietniewski e Kiss, 2013] que a curva de temperatura A1 corresponde à interface entre os campos ferrita-cementita e austenita-ferrita, enquanto a curva de temperatura A3 determina o limiar entre o campo ferrita-austenita e a região austenítica.

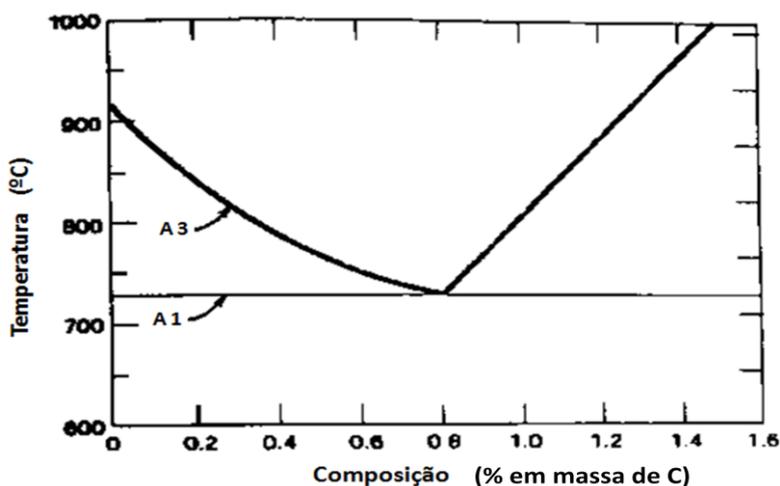


Figura 2.15 Temperaturas de transformação importantes no diagrama Fe-C, na região de baixo carbono [Kwietniewski e Kiss, 2013, modificado].

Na figura 2.16 pode-se ver as regiões de um ponto de solda relacionadas com as temperaturas de transformação de fase do diagrama ferro-carbono. As possíveis transformações estruturais que ocorrem em cada região (1, 2, 3, 4, 5 e 6) indicadas na figura 2.16, são apresentadas na tabela 2.1.

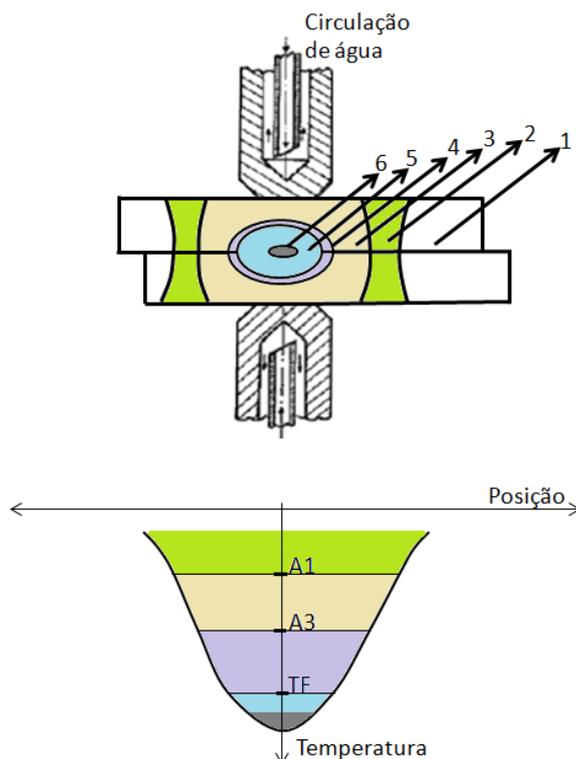


Figura 2.16 Macroregiões de um ponto de solda associadas às temperaturas de transformação do aço [Batista, 2011, modificado].

Tabela 2.1 Regiões do ponto de solda e suas características.

Região	Macroestrutura	Curvas de temperatura envolvida	Microestrutura no aquecimento	Microestrutura no resfriamento
1	Metal Base	-	Microestrutura do metal base	Microestrutura do metal base
2	ZAC	$A1 \leq 2$	Ferrita e perlita - dependendo da composição química do aço	Ferrita e perlita - dependendo da composição química do aço. Grão com diferente arranjo do metal base (tendência à grão colunares)
3	ZAC	$A1 < 3 \leq A3$	Ferrita e austenita	Ferrita, perlita, bainita, martensita e austenita retida - dependendo da taxa de resfriamento e composição química do aço (grãos colunares)

4	ZAC	$A_3 < 4 < TF$	Homogeneização e/ou crescimento dos grão de austenita	Ferrita, perlita, bainita, martensita e austenita retida - dependendo da taxa de resfriamento e composição química do aço - tendência à grão colunares e estruturas dendríticas
5	Zona Fundida	$5 \leq TF$	Líquido fundido	estrutura bruta de fusão: ferrita, perlita, bainita, martensita e austenita retida - tendência à grãos colunares, grão equiaxiais e estruturas dendríticas
6	Zona Fundida	$6 < TF$	Líquido fundido	estrutura bruta de fusão: ferrita, perlita, bainita, martensita e austenita retida - tendência à grãos colunares, grão equiaxiais e estruturas dendríticas - último líquido à solidificar

As microestruturas formadas em cada região do ponto de solda dependem, principalmente, da composição química do aço (teor de carbono e elementos de liga) e da quantidade de calor, além das taxas de aquecimento e resfriamento ao qual o material é submetido durante o processo de soldagem.

Quanto à microdureza, faz-se um perfil analisando a região fundida e a região termicamente afetada. Normalmente, valores mais altos de microdureza na zona fundida e na ZAC indicam maiores resistência ao cisalhamento das regiões do ponto [Batista, 2011].

A dureza da zona fundida, além de influenciar na resistência ao cisalhamento contribui para a falha na solda quando esta é submetida a forças de impacto ou vibração. Para esta situação, uma dureza excessiva pode resultar em falhas devido a trincas de fadiga. [Amaral, 2011].

A microdureza de fases fora do equilíbrio termodinâmico, como a bainita e a martensita, são função do teor de carbono e de elementos de liga presentes no aço [Pouranvari, Marashi e Mousavizadeh, 2010].

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A metodologia utilizada para elaboração do presente trabalho segue o fluxograma apresentado na figura 3.1.

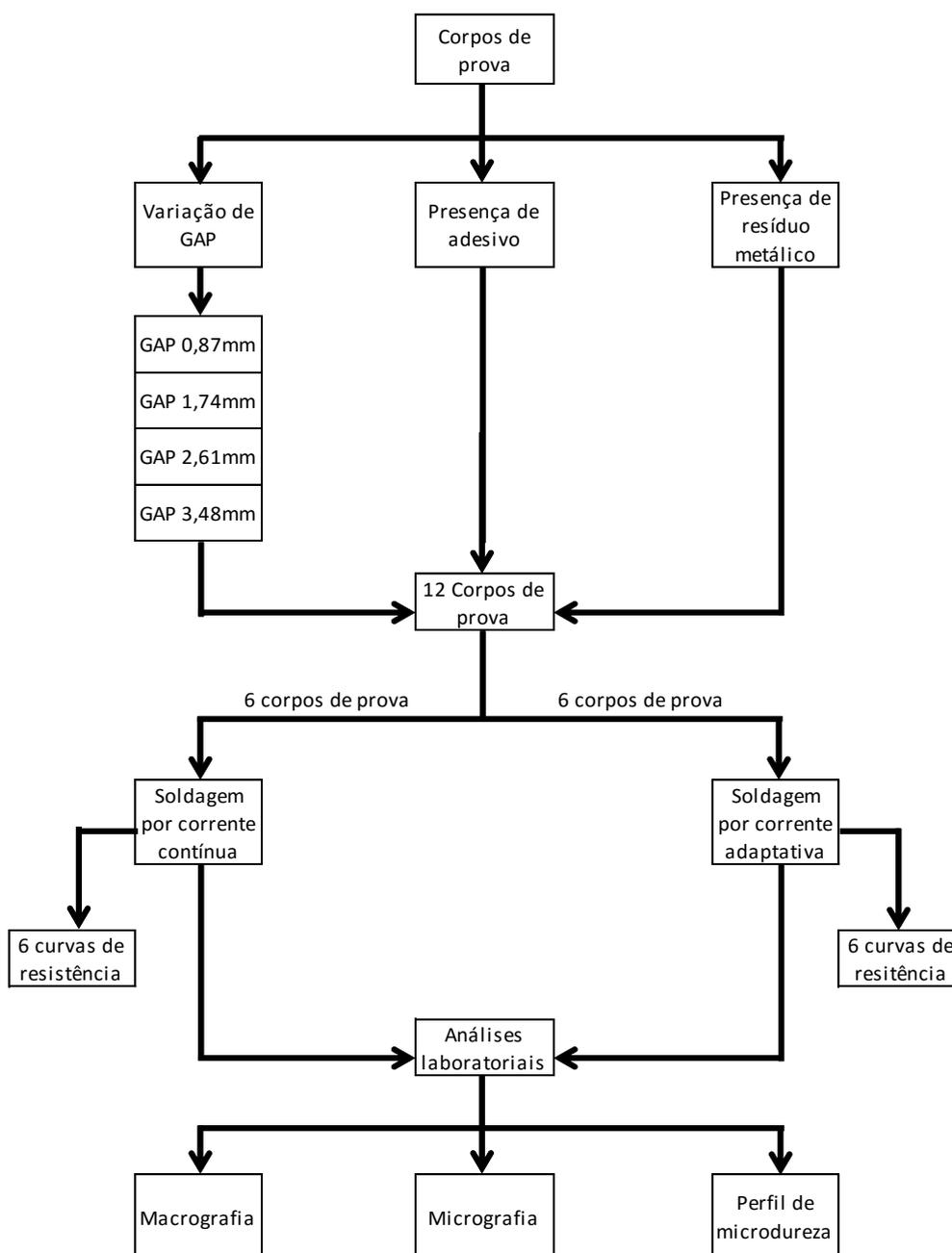


Figura 3.1 Fluxograma do ensaios e análises realizadas.

O detalhamento do fluxograma será apresentado nas próximas seções.

3.1 Corpos de prova

Os corpos de prova estruturados tiveram como objetivo simular situações reais encontradas na linha de produção de uma indústria automobilística e que possam afetar o processo de união de chapas via soldagem a ponto por resistência elétrica. Foram simuladas 3 tipos de situações:

1. Presença de espaçamento entre as chapas a serem soldadas (GAP's) - 04 variações de espaçamento diferentes;
2. Presença de adesivo entre as chapas;
3. Presença de resíduo metálico entre as chapas;

Para a confecção dos corpos de prova foram utilizadas chapas de aço, resíduos de lixamento e adesivo para vedação. Para a análise comparativa foi estruturado um corpo de prova para cada método (corrente contínua vs. corrente adaptativa) para cada uma das 06 variações de processo abordadas.

3.1.1 Chapas de aço

Foram utilizados recortes de chapas de aço utilizadas na indústria automobilística. O material foi recebido em bobinas e, após o processo de estampagem de um painel da região interna da carroceria foram coletados recortes do aço. As dimensões de comprimento e largura são muito similares em todas as chapas utilizadas, dada à precisão do processo de estampagem que é realizado na indústria automobilística. As bobinas utilizadas para a estampagem deste painel são de aço CR-3, laminado a frio, e são fornecidas pela empresa ArcelorMittal do Brasil S.A., a composição química do material é informada na tabela 3.1. As chapas foram utilizadas para estruturar corpos de prova, simulando variações possíveis em um processo de estruturação de veículos.

Cada recorte possui formato retangular, de 145,0 mm por 55,7 mm, sendo uma extremidade em ângulo, conforme a figura 3.2. As chapas possuem espessura bem definida de 0,870 mm, determinada através de um especímetro da marca Kroeplin Laengenmesstechnik, conforme a Figura 3.3.

Tabela 3.1 Composição química (%) do aço CR-3 fornecida pela ArcelorMittal, análise de panela da corrida 3470437.

Ca	0,0015	Ni	0,0050	As	0,00110
Si	0,0080	Cr	0,0220	Ti	0,03900
Mn	0,1140	Mo	0,0010	B	0,00010
P	0,0130	V	0,0030	Co	0,00000
S	0,0062	Nb	0,0012	Zr	0,00100
Al	0,0440	N	0,0021	Sb	0,00100
Cu	0,0100	Sn	0,0010	Ca	0,00020

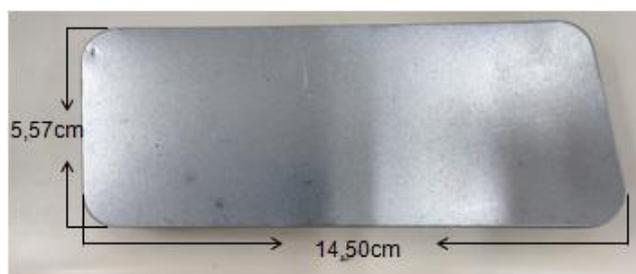


Figura 3.2 Recorte de 145,0mmx55,7mm da chapa de aço utilizado para a confecção dos corpos de prova.



Figura 3.3 Espessura do recorte da chapa de aço, medida com especímetro Kroepelin Laengenmesstechnik C1X027.

3.1.2 Espaçamento entre chapas - GAP

Para a simulação da presença de gap foram utilizadas seções menores dos recortes das chapas de aço como apoios. Estes apoios foram posicionados/empilhados nas extremidades das chapas e soldados com um Robô Fanuc R-2000iB 210F para impedir movimentações. A cada seção empilhada é acrescido 0,870mm de GAP entre as chapas, conforme é apresentado na figura 3.4, uma vez que os apoios são seções do mesmo recorte de aço com 0,870mm de espessura.

Foram simuladas 4 variações de GAP's: 0,870 mm, 1,74 mm, 2,61 mm e 3,48 mm. O ponto de solda analisado para o comparativo entre soldagem por corrente constante e soldagem por corrente adaptativa foi aplicado no centro de cada corpo de prova - foi estruturado um conjunto de corpos de prova com as quatro variações de GAP para cada método de soldagem.

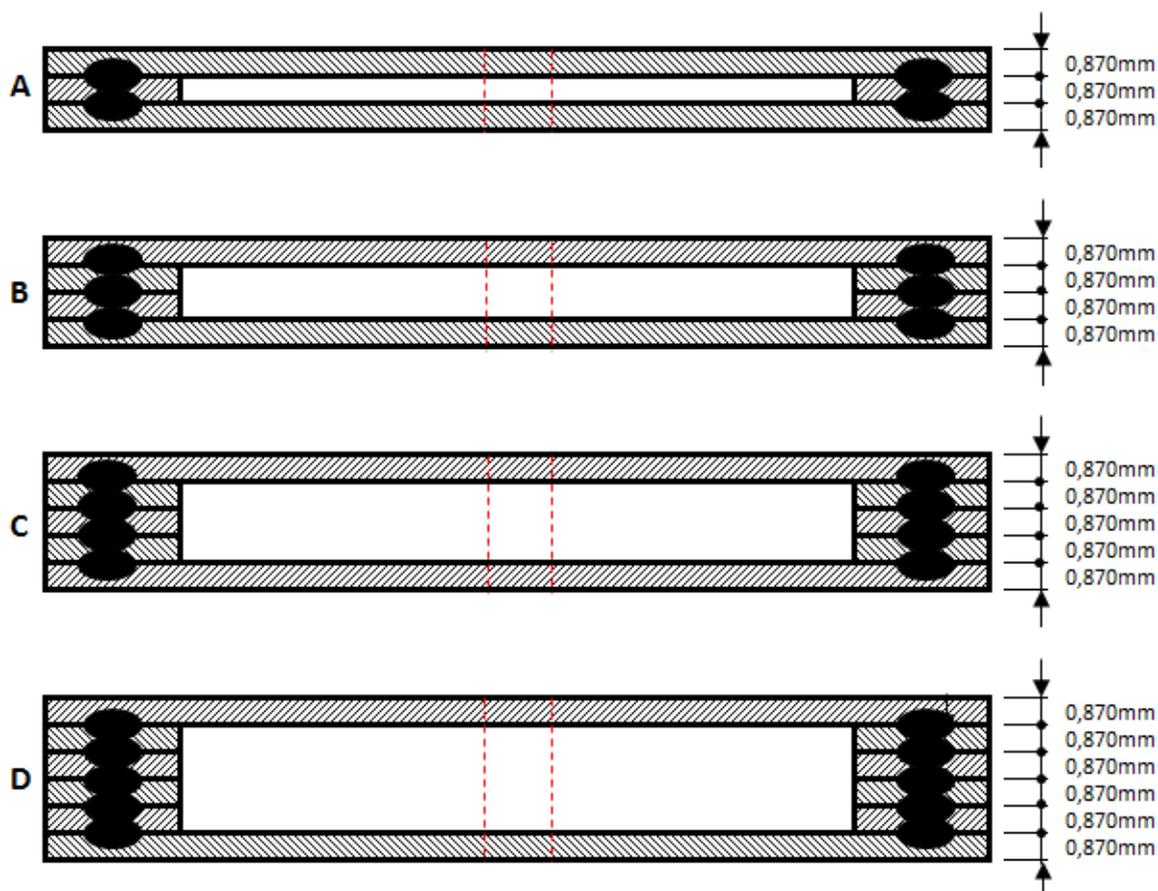


Figura 3.4 Representação das estruturas dos corpos de provas simulando GAP's (A) 0,870 mm (B) 1,74 mm (C) 2,61mm e (D) 3,48 mm. Em vermelho o destaque da região onde o ponto de solda analisado foi aplicado.

3.1.3 Presença de adesivo

A estruturação dos corpos de prova com presença de adesivo consistiu em aplicar-se em uma das chapas, uma fina camada de adesivo poliacrílico, Sika Seal 704, utilizado para vedação de gases e suporte para calafetação em indústrias automobilísticas. A aplicação foi realizada com o auxílio de um pincel. Após foi feito o fechamento da chapa adjacente e as extremidades foram unidas com pontos de solda, utilizando-se um Robô

Fanuc R-2000iB 210F, para evitar deslizamentos e perda de material. O Ponto de solda analisado para o comparativo entre métodos foi aplicado no centro de cada corpo de prova - foi estruturado?? um corpo de prova com a presença de adesivo entre chapas para cada modo de corrente de soldagem.

A representação da estrutura do corpo de prova simulando a presença de adesivo é apresentada na figura 3.5.

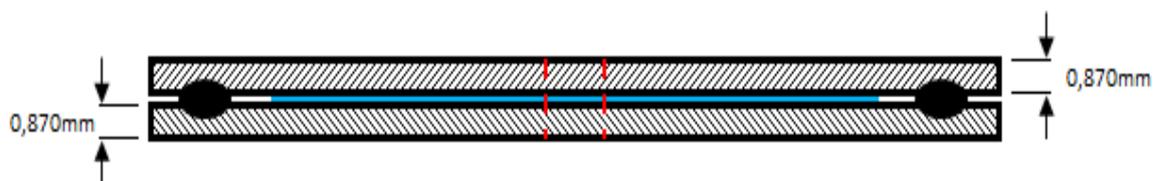


Figura 3.5 Representação da estrutura do corpo de prova com a presença de adesivo entre as chapas. Em vermelho o destaque da região onde o ponto de solda analisado foi executado.

3.1.4 Resíduo Metálico

A deposição de resíduo metálico entre as chapas a serem soldadas tem o objetivo de simular a soldagem a ponto em superfícies com deposição de material que ocorre em função de retrabalhos realizados na linha de produção, bem como partículas metálicas que possam estar no ambiente e se depositam sobre as superfícies que serão soldadas. Para a simulação foi coletado resíduo metálico resultante do lixamento de regiões da carroceria como retrabalho na correção de amassados, caroços, respingos de solda, etc.

O material foi disperso sobre uma das chapas, após foi realizado o fechamento com a chapa adjacente e, para evitar perda de material particulado, as extremidades foram unidas com pontos de solda, utilizando-se um Robô Fanuc R-2000iB 210F. O Ponto de solda analisado para o comparativo entre métodos foi aplicado no centro de cada corpo de prova - foi estruturado um corpo de prova para cada método de soldagem.

A representação da estrutura do corpo de prova simulando a presença de adesivo é apresentada na figura 3.6.

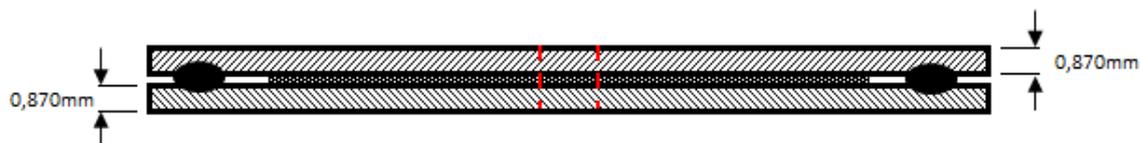


Figura 3.6 Representação da estrutura do corpo de prova com a presença de resíduo metálico entre as chapas. Em vermelho o destaque da região onde o ponto de solda analisado foi aplicado.

3.2 Processo de soldagem

3.2.1 Definição de parâmetros e procedimento experimental

Os pontos de solda para a análise comparativa entre soldagem com corrente contínua e soldagem com corrente adaptativa foram soldados utilizando-se um Robô Fanuc R-2000iB 210F, apresentado na figura 3.7a. Para o *setup* de parâmetros e monitoramento da solda foi utilizado um controlador de solda da Welding Technology Corp (WTC), tipo GWS-2D-C1B, modelo 6005, apresentado na figura 3.7b. Cada variação de processo -GAP de 0,870 mm, GAP de 1,74 mm, GAP de 2,61 mm, GAP de 3,48 mm, presença de adesivo, presença de resíduo metálico - foi avaliada pelo método tradicional de corrente constante e pelo método de corrente adaptativa.

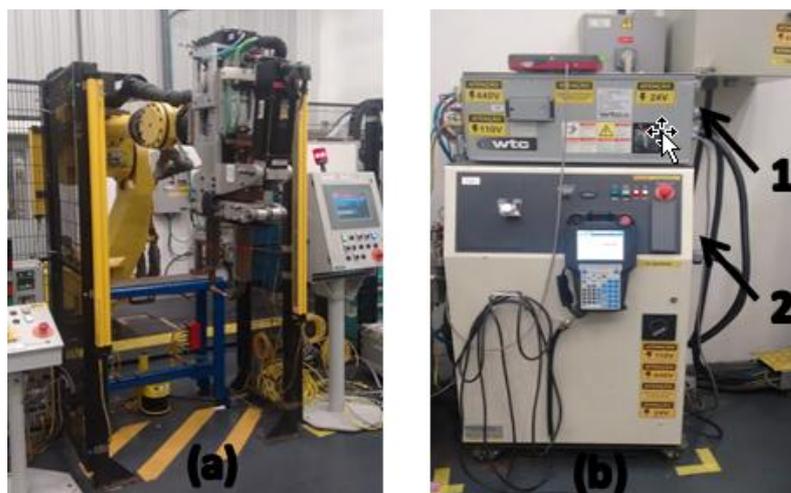


Figura 3.7 (a) Robô Fanuc R-2000iB 210F utilizado para soldagem dos corpos de prova. (b) em 1 controlador de solda da Welding Technology Corp (WTC), tipo GWS-2D-C1B, modelo 6005 e em 2 Controlador do Robô Fanuc R-2000iB 210F.

Para a elaboração dos pontos de solda analisados, foram utilizados eletrodos esféricos padrões novos, para eliminar influências de eletrodos desgastados nos pontos de solda. Os eletrodos possuem 20mm de altura e 16mm de diâmetro, conforme a figura 3.8.

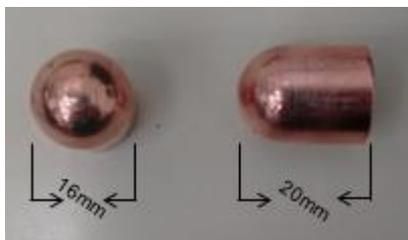


Figura 3.8 Eletrodos esféricos padrão utilizados para a soldagem dos corpos de prova. À esquerda vista superior e à direita vista lateral esquerda.

Segundo norma AWS [1991], na união de duas chapas de baixo carbono por soldagem a ponto em que a chapa mais fina possui 0,035 polegadas (correspondente à 0,889mm) de espessura o diâmetro mínimo de botão de solda esperado é de 0,16 polegadas (correspondente à 4,064mm). Sendo assim, para a soldagem dos corpos de prova é necessário um diâmetro mínimo de botão de 4,00mm. Os parâmetros de solda utilizados para gerar um ponto de referência seguem na tabela 3.2, e o ponto de referência obtido a partir destes parâmetros é apresentado na figura 3.9.

Tabela 3.2 Parâmetros de solda utilizados na soldagem dos corpos de prova, tanto para corrente constante, quanto para corrente adaptativa.

Tempo de pré-pressão	Corrente de solda	Tempo de solda	Força de fechamento dos eletrodos	Tempo de pós-pressão
10 ms	6 kA	300 ms	400 kgf	10 ms



Figura 3.9 Ponto de referência aos quais parâmetros foram utilizados na soldagem dos corpos de provas.

Os parâmetros utilizados para a soldagem da referência obtiveram um ponto com diâmetro de 5,00mm de botão, cumprindo a norma da AWS para esta espessura de chapa. Logo, os parâmetros da tabela 3.2 puderam ser utilizados para soldar os corpos de prova e, a partir deste processo, será avaliada a influência das variações de processo nas dimensões e propriedades dos pontos. Todos os corpos de prova foram soldados utilizando-se os parâmetros da tabela 3.2, independentemente se a soldagem ocorreu pelo método tradicional de corrente constante ou pelo método de corrente adaptativa.

3.2.2 Curvas de resistência

As curvas da variação de resistência dinâmica durante a solda de cada um dos pontos nos corpos de prova foram fornecidas pelo software RAFT Gateway (Versão 3.5.2.1) da Welding Technology Corp (WTC). A partir das curvas de resistência dinâmica foi possível visualizar se houve ou não expulsões de material, bem como acompanhar o passo à passo da solda: variação de resistência, compensação de corrente no caso da corrente adaptativa, calor gerado, etc.

3.3 Análises Laboratoriais

As amostras soldadas com os dois modos de corrente foram comparadas através de ensaios de macrografia, micrografia e perfil de microdureza. Com o objetivo comparar-se os dois métodos quanto à absorver as variações de processo simuladas nos corpos de prova.

Todas as amostras foram cortadas com uma cortadora metalográfica Struers SECOTON-10, localizada no LAMEF/UFRGS, e embutidas à frio.

3.3.1 Macrografia

Para a investigação macrográfica dos pontos de solda gerados, as amostras já cortadas e embutidas foram preparadas com lixamento, polimento e ataque químico para revelar a estrutura do ponto de solda. Na avaliação macrográfica buscou-se encontrar defeitos que possam afetar as propriedades mecânicas esperadas para o ponto de solda, como falta de fusão entre as chapas, pequeno tamanho de ponto, trincas e porosidades.

Além de se determinar as dimensões do ponto e visualizar a extensão da zona afetada pelo calor.

O lixamento ocorreu seguindo-se uma sequência crescente de granulometrias de lixas, desde a 80 a 1200. O polimento foi realizado utilizando-se pasta de diamante e álcool com um pano de 1 micron. O ataque químico foi realizado com uma solução de Nital 2%. As macrografia foram obtidas com o auxílio de uma Lupa Olympus 5z-ctv, alocada no LAMEF/UFRGS, e foram analisadas com o auxílio do software ImageJ.

3.3.2 Micrografia

Para a investigação micrográfica dos pontos de solda gerados, as amostras já cortadas e embutidas foram preparadas com lixamento, polimento e ataque químico para revelar a microestrutura do ponto de solda. Neste ensaio buscou-se comparar a microestrutura encontrada para cada um dos métodos de soldagem (corrente contínua e corrente adaptativa) para cada variação de processo, uma vez que as propriedades mecânicas do ponto estão intimamente ligadas à sua microestrutura. Também buscou-se identificar defeitos que não se tornaram visíveis na macrografia.

O lixamento ocorreu seguindo-se uma sequência crescente de granulometrias de lixas, desde a 80 a 1200. O polimento foi realizado utilizando-se pasta de diamante e álcool com um pano de 1 micron. O ataque químico foi realizado com uma solução de Nital 2%. As imagens macrográficas foram obtidas com o auxílio de um Microscópio Olympus BX51M, alocado no LAMEF/UFRGS.

3.3.3 Perfil de microdureza

As análises de microdureza foram realizadas utilizando-se um Microdurômetro Struers Duramin, localizado no LAMEF/UFRGS. Estas análises tiveram como objetivo traçar o perfil de microdureza de cada um dos pontos de solda e poder inferir sobre seus modos de falha, com base na literatura. Assim, foi possível entender como as variações de processo podem influenciam na durabilidade e na resistência dos pontos quando não são consideradas no processo.

Para o perfil de microdureza Vickers os pontos foram separados em regiões, conforme figura 3.10, e indentações com uma carga de 0,1kg por 10 segundos foram

aplicadas em 3 locais de cada região. Após fez-se uma média destas indentações para a determinação da microdureza da região. Na tabela 3.3 são explicitadas as informações de cada região em que foram realizadas as indentações.

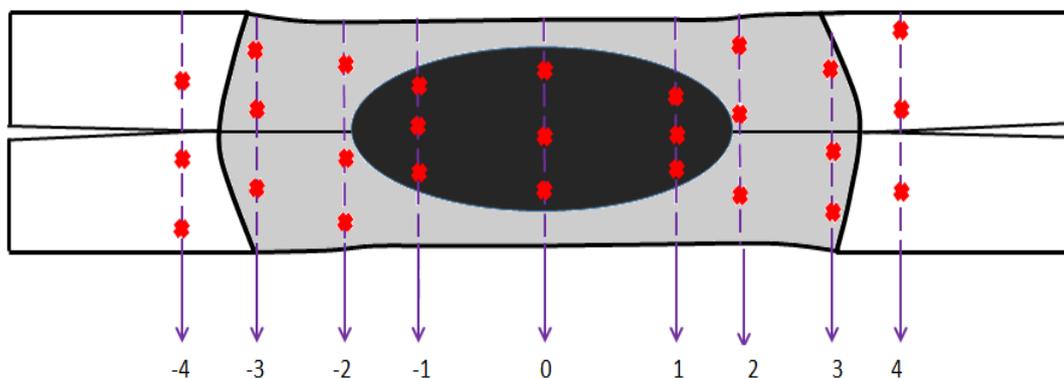


Figura 3.10 Representação das regiões, em roxo, as quais a microdureza foram analisadas. Marcações em vermelho representam as indentações realizadas.

Tabela 3.3 Relação entre as regiões analisadas e a macroestrutura à qual pertencem no ponto de solda.

Macroestrutura	Região
Metal Base	4
	-4
Zona termicamente afetada	3
	2
	-3
	-2
	-1
Zona Fundida	1
	0
	-1

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Curvas de resistência dinâmica

Cada ponto de solda realizado teve sua curva de resistência dinâmica fornecida pelo software RAFT Gateway (Versão 3.5.2.1) da Welding Technology Corp (WTC), interligado ao robô que realizou a solda.

A figura 4.1 apresenta as curvas de resistência dinâmica obtidas para a variação de GAP de 0,87 mm com corrente constante e com corrente adaptativa. Na figura 4.2 são apresentadas as curvas obtidas para a variação de GAP de 1,74 mm com os dois modos de corrente de solda. As curvas obtidas para o GAP de 2,61 mm são apresentadas na figura 4.3. A figura 4.4 apresenta as curvas para o GAP de 3,48 mm.

Os resultados obtidos para os corpos de prova com a aplicação de adesivo entre chapas estão representados na figura 4.5. Para os corpos de prova com a presença de resíduo metálico entre as chapas as curvas de resistência dinâmica seguem na figura 4.6.

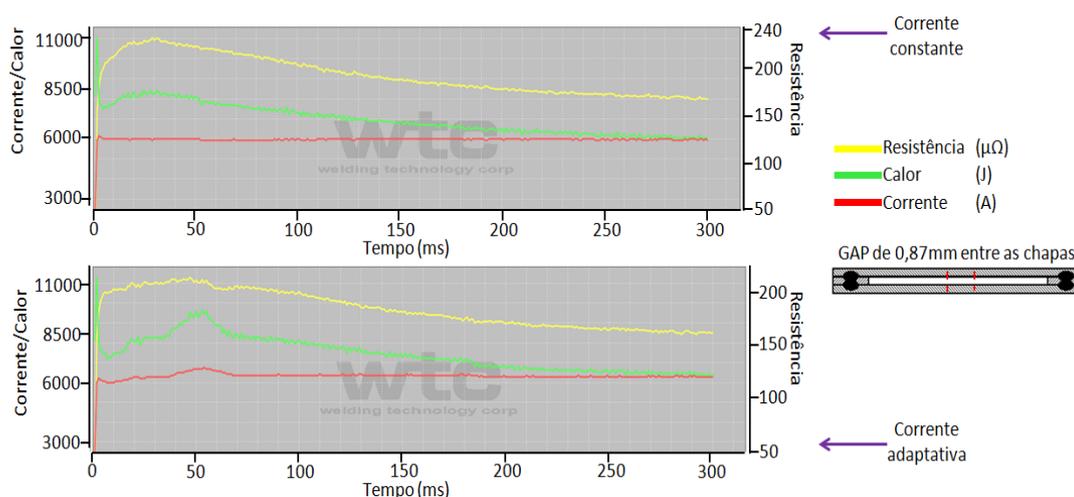


Figura 4.1 Curvas de resistência dinâmica para GAP de 0,87 mm entre chapas. Soldagem com corrente constante na imagem superior e com corrente adaptativa na imagem inferior.

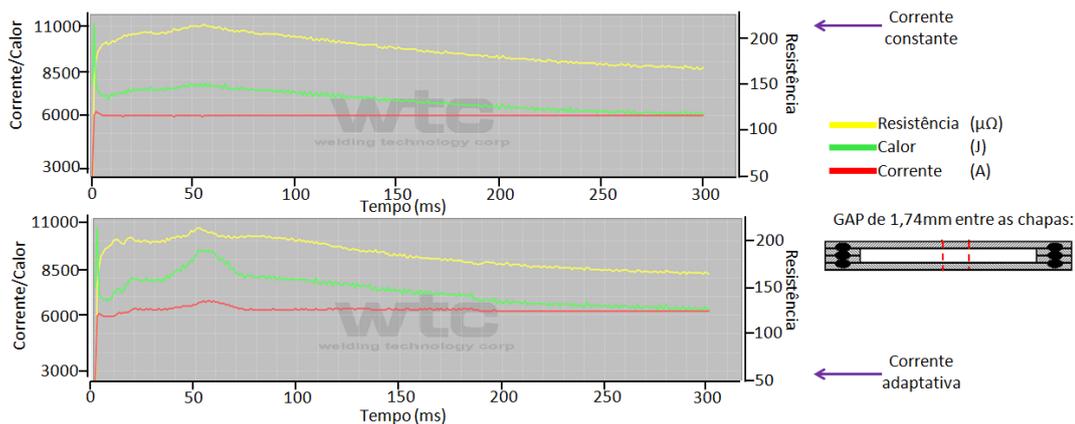


Figura 4.2 Curvas de resistência dinâmica para GAP de 1,74 mm entre chapas. Soldagem com corrente constante na imagem superior e com corrente adaptativa na imagem inferior.

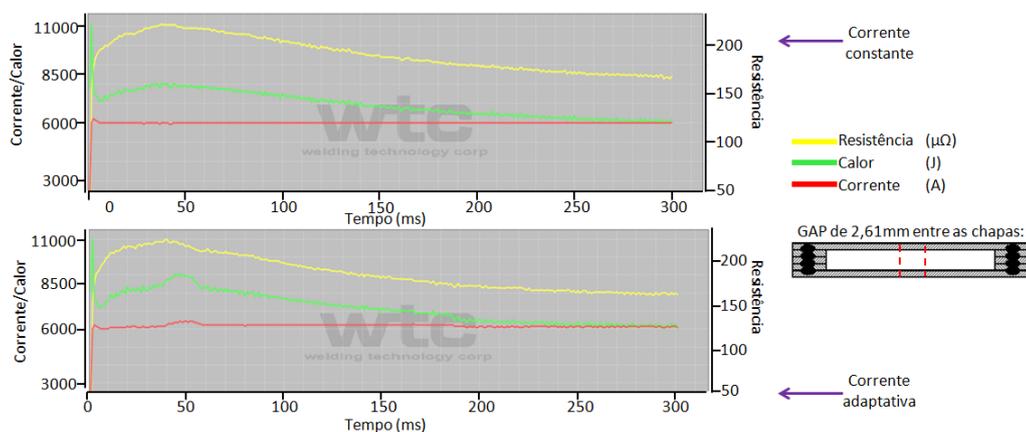


Figura 4.3 Curvas de resistência dinâmica para GAP de 2,61 mm entre chapas. Soldagem com corrente constante na imagem superior e com corrente adaptativa na imagem inferior.

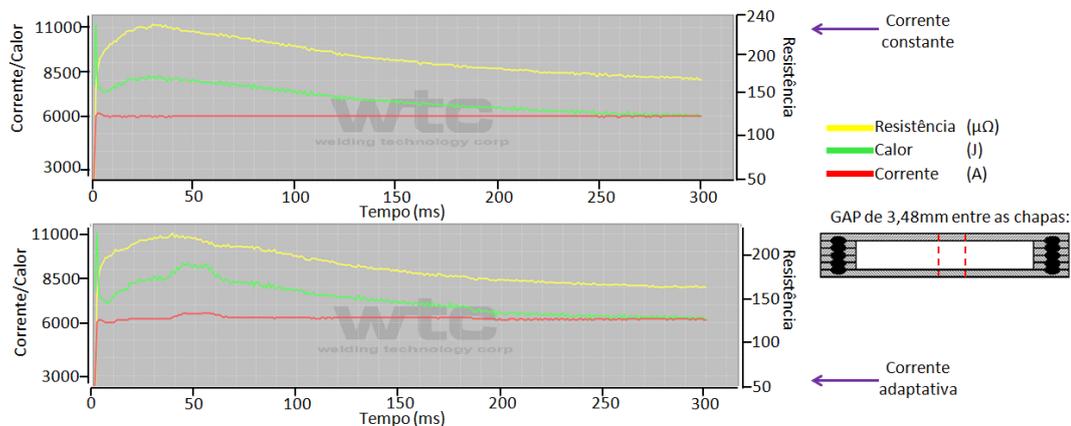


Figura 4.4 Curvas de resistência dinâmica para GAP de 3,48 mm entre chapas. Soldagem com corrente constante na imagem superior e com corrente adaptativa na imagem inferior.

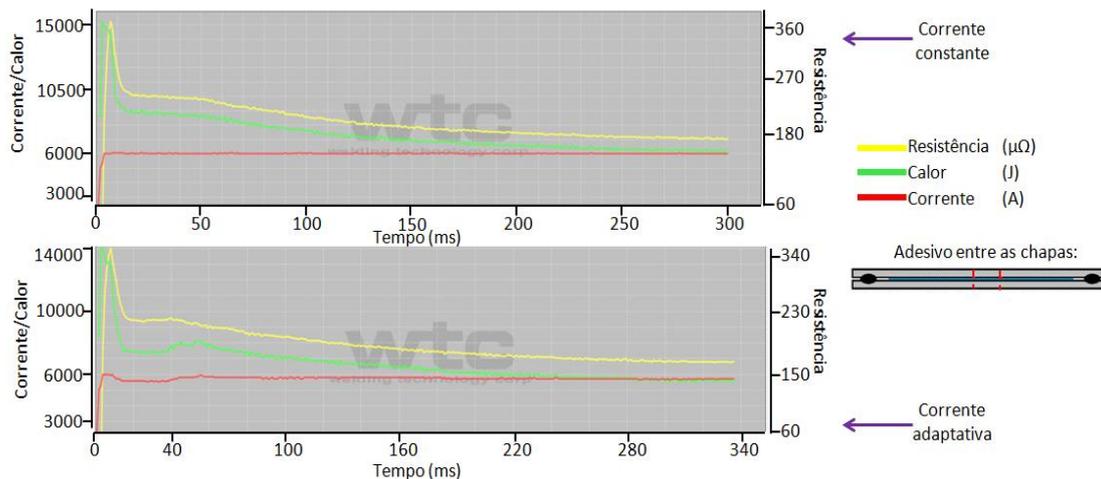


Figura 4.5 Curvas de resistência dinâmica dos corpos de prova com adesivo entre chapas. Soldagem com corrente constante na imagem superior e com corrente adaptativa na imagem inferior.

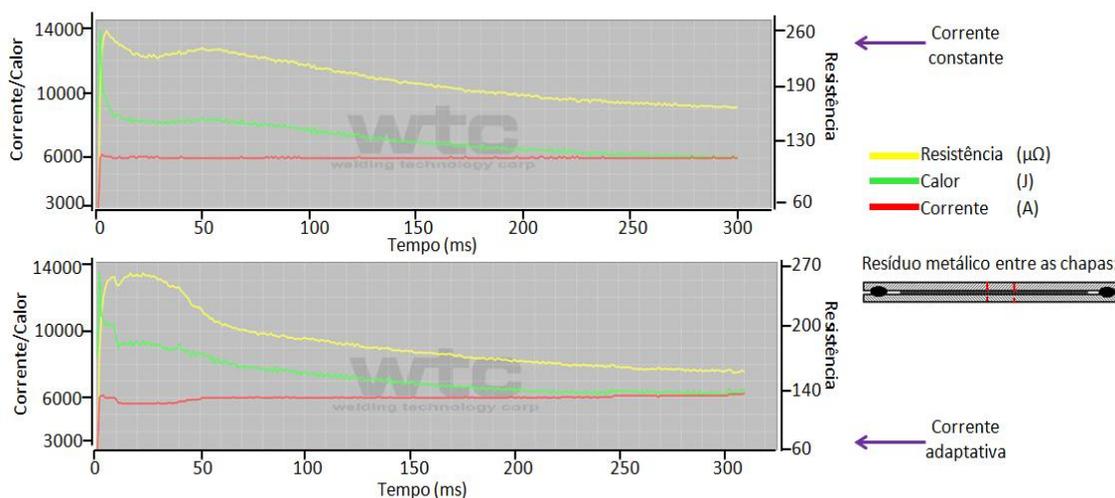


Figura 4.6 Curvas de resistência dinâmica dos corpos de prova com resíduo metálico entre chapas. Soldagem com corrente constante na imagem superior e com corrente adaptativa na imagem inferior.

A partir das curvas de resistência dinâmica apresentadas pode-se observar que para as variações de GAP a compensação de corrente realizada pelo modo adaptativo foi no sentido positivo do valor nominal de corrente, enquanto que para os corpos de prova com presença de adesivo e resíduo metálico entre as chapas a compensação de corrente realizada foi sentido negativo do valor nominal de corrente. Também é possível perceber que a adaptação de corrente gera um valor de pico na quantidade de calor, fato explicável pelo efeito Joule (equação 2.1). Os valores de pico de corrente com seus respectivos valores de quantidade de calor estão representados na tabela 4.1.

Tabela 4.1 Detalhes de picos e compensações em cada corpo de prova.

Variação de processo		Modo de corrente	Pico de calor gerado na fusão (J)	Tempo do pico de calor (ms)	Valor de pico de resistência dinâmica ($\mu\Omega$)	Pico de adaptação de corrente (A)	Compensação no tempo de término da solda (ms)
GAP	0,87 mm	Corrente Constante	8500	30	230	6000	-
		Corrente Adaptativa	9750	47	225	6800	-
	1,74 mm	Corrente Constante	7900	55	220	6000	-
		Corrente Adaptativa	9500	50	217	6900	-
	2,61 mm	Corrente Constante	8000	40	222	6000	-
		Corrente Adaptativa	9000	40	225	6500	-
	3,48 mm	Corrente Constante	8200	30	230	6000	-
		Corrente Adaptativa	9400	45	225	6550	-
	Presença de adesivo	Corrente Constante	8900	30	245	6000	-
		Corrente Adaptativa	7500	40	240	5600	40
	Presença de resíduo metálico	Corrente Constante	8400	50	250	6000	-
		Corrente Adaptativa	9200	25	265	5800	-

Na figura 4.5, referente aos corpos de prova com a presença de adesivo entre as chapas, percebe-se um comportamento diferenciado no valor da resistência dinâmica e no calor gerado nos primeiros 20 ms de solda. Estes picos são associados à queima do adesivo. Nestas curvas a formação da lentilha de solda ocorre com menor geração de calor, uma vez que a energia do pico de queima do adesivo auxilia na formação do botão de solda. Na soldagem adaptativa, o equipamento realizou, além da compensação negativa de corrente no momento da formação do botão, um acréscimo de tempo no final do processo. O equipamento entende que para a formação de um ponto "bom" para esta situação, o ajuste de corrente não foi suficiente e estendeu o tempo de soldagem em quase 40 ms.

Na figura 4.6, referente aos corpos de prova com a presença de resíduo metálico entre as chapas, existe um comportamento similar às curvas da figura 4.5, porém mais

suave: picos no valor da resistência dinâmica antes da formação do botão de solda. Este comportamento é associado à fusão das partículas entre chapas. Uma vez que estas pequenas partículas possuem pouca massa e uma grande área de contato, a fusão nestas partículas ocorre rapidamente. Assim como na queima do adesivo, a energia gerada com esta fusão auxilia na formação do botão de solda, gerando valores mais baixos para o pico de resistência associado à formação do ponto.

Em nenhum ponto de solda produzido, tanto por corrente constante, quanto por corrente adaptativa, houve a expulsão de material fundido do núcleo do ponto, uma vez que não há quedas abruptas no valor da resistência dinâmica após a fusão do material. Assim, não foi possível relacionar a presença de variáveis de processo à expulsão de material, bem como avaliar a eficácia do feedback adaptativo em evitar expulsões.

Pela tabela 4.1 é perceptível a influência da energia da queima do adesivo nos valores de corrente durante a formação do ponto de solda, uma vez que no modo de corrente adaptativa houve uma redução no valor de corrente, em uma tentativa do equipamento de reduzir, por efeito Joule, a quantidade de calor fornecida. Para a corrente contínua este efeito não é percebido, uma vez que não são possíveis ajuste nos valores de corrente.

O efeito de redução da corrente como tentativa do equipamento para reduzir a quantidade de calor fornecida é visível para o caso do adesivo entre chapas. Mas para o caso da presença de resíduo têm-se um valor elevado de quantidade de calor. Isto pode ser associado a um volume maior de partículas metálicas concentradas na região de formação do ponto no corpo de prova soldado por corrente adaptativa. Essa concentração maior de partículas é possível uma vez que não foram adicionadas massas precisamente iguais durante a estruturação dos corpos de provas para corrente contínua e corrente adaptativa.

Quanto aos valores de resistência dinâmica envolvidos na fusão percebe-se que resultados obtidos para os dois métodos são muito similares variando, no máximo, $5 \mu\Omega$ para 83,33% das variações de processo. Apenas para os corpos de prova com a presença de resíduo metálico obtiveram valores mais distantes de resistência dinâmica entre o método adaptativo e o método convencional. Pode-se assimilar este resultado a possibilidade de um volume maior de partículas metálicas no corpo de prova soldado por corrente adaptativa, do que no corpo de prova soldado por corrente contínua. Esta suposição estaria de acordo com o resultado observado em relação ao valor de pico da quantidade de calor

no corpo de prova com presença de resíduo metálico soldado por corrente adaptativa, conforme discutido anteriormente.

A eficácia de cada método em produzir pontos com as dimensões e propriedades desejadas foram avaliadas através das análises laboratoriais.

4.2 Análises Laboratoriais

4.2.1 Macrografias

As macrografias de cada ponto de solda foram realizadas utilizando-se uma Lupa Olympus 5z-ctv e são apresentadas nas figuras 4.7 a 4.12.

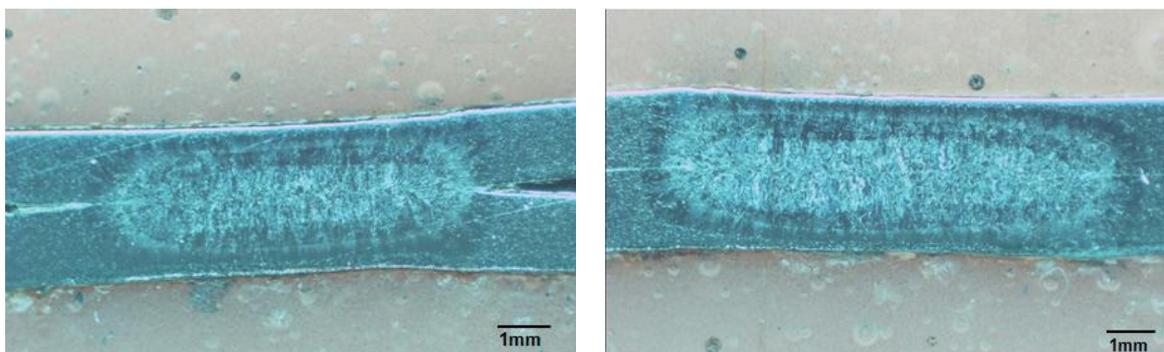


Figura 4.7 Macroestruturas dos pontos de solda com GAP de 0,87 mm entre chapas. À esquerda o ponto de solda produzido com corrente constante e à direita o ponto de solda com corrente adaptativa.

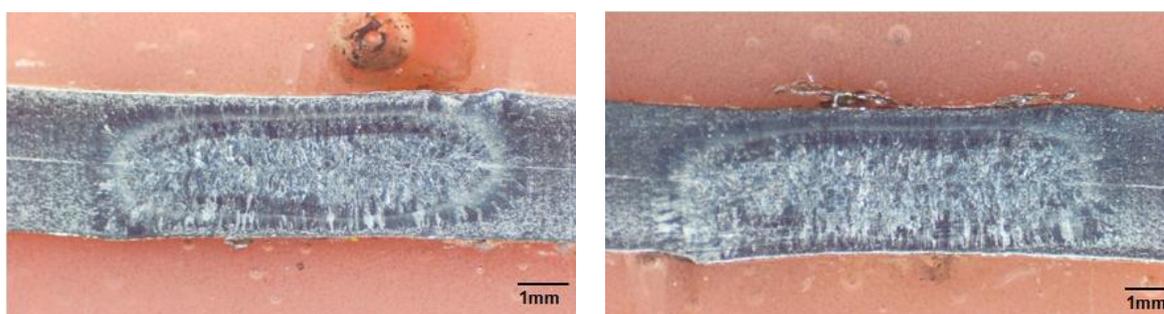


Figura 4.8 Macroestruturas dos pontos de solda com GAP de 1,74 mm entre chapas. À esquerda o ponto de solda produzido com corrente constante e à direita o ponto de solda com corrente adaptativa.

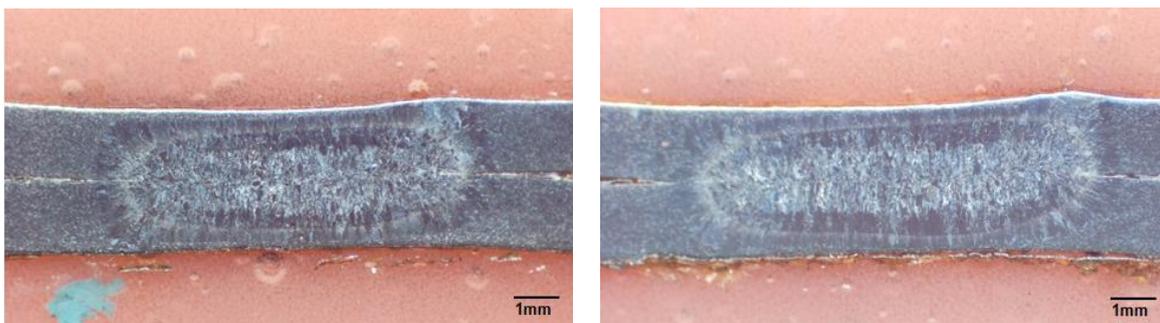


Figura 4.9 Macroestruturas dos pontos de solda com GAP de 2,61 mm entre chapas. À esquerda o ponto de solda produzido com corrente constante e à direita o ponto de solda com corrente adaptativa.

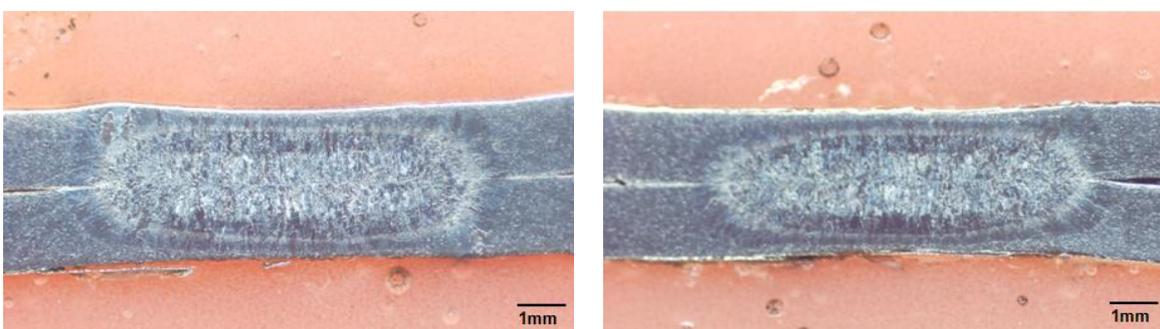


Figura 4.10 Macroestruturas dos pontos de solda com GAP de 3,48 mm entre chapas. À esquerda o ponto de solda produzido com corrente constante e à direita o ponto de solda com corrente adaptativa.

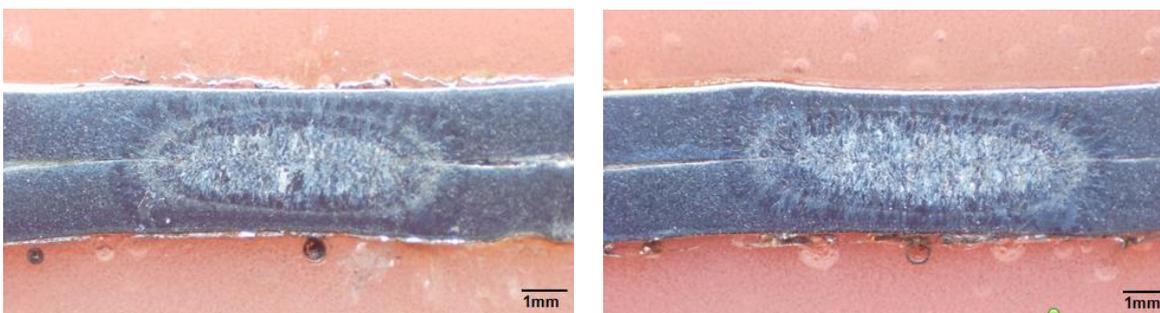


Figura 4.11 Macroestruturas dos pontos de solda contendo adesivo entre chapas. À esquerda o ponto de solda produzido com corrente constante e à direita o ponto de solda com corrente adaptativa.

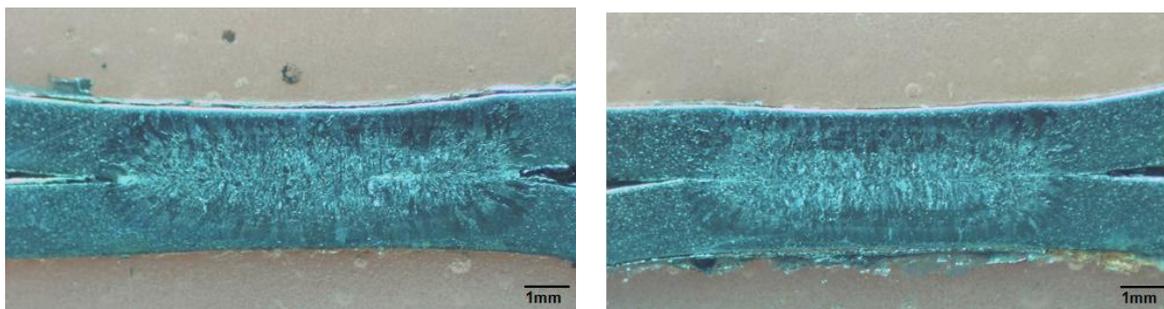


Figura 4.12 Macroestruturas dos pontos de solda contendo resíduo metálico entre chapas. À esquerda o ponto de solda produzido com corrente constante e à direita o ponto de solda com corrente adaptativa.

Em todos os pontos obtidos é possível observar a região fundida com estrutura bruta de fusão, a zona termicamente afetada com grãos colunares e o metal base com grãos inalterados. Em nenhuma amostra houve falta de fusão no ponto de solda. Entretanto houve a formação de porosidades em dois pontos e a precipitação de uma segunda fase em um terceiro ponto.

A partir da figura 4.9, pode-se observar a presença de porosidades na região central inferior da ZAC do ponto de solda com GAP de 2,61mm entre chapas, produzido com corrente contínua. Na figura 4.11 foram revelados 2 poros esféricos nas bordas da zona fundida do ponto soldado com corrente constante. No corpo de prova com a presença de resíduo metálico entre chapas soldado com corrente contínua (lado esquerdo da figura 4.12) percebe-se uma região mais clara no interior do núcleo fundido, esta região trata-se da formação de uma segunda fase no interior do ponto. Os defeitos revelados nas macrografias, infelizmente, são de difícil percepção. Para facilitar a identificação destes defeitos, analisou-se novamente estas regiões por micrografia.

Com o auxílio do software ImageJ foram determinadas as dimensões dos pontos de solda, ou seja, diâmetro do botão e penetração. A tabela 4.2 apresenta os valores obtidos.

Sabe-se que, [AWS,1991] para a soldagem dos corpos de prova com a espessura de chapa utilizada o diâmetro mínimo de botão é de 4,00mm e que a penetração mínima aceitável é de 20% em cada chapa [Furlanetto, 2014] - no caso das espessuras utilizadas a penetração total mínima deve ser de 0,348 com um ponto bem centrado entre as chapas.

Analisando a tabela 4.2 pode-se concluir que, quanto à penetração todos os pontos de solda gerados, tanto para o método adaptativo quanto para o método tradicional, foram

aprovados. Quanto ao diâmetro do ponto de solda, nenhum dos corpos de prova obteve os 5mm de diâmetro utilizados na referência, indicando a influência das variações de processo, independentemente do método, no diâmetro final do ponto de solda. Em 3 pontos de solda não se obteve o valor mínimo de aprovação do diâmetro do ponto de solda.

Tabela 4.2 Dimensões dos pontos de solda obtidos com o auxílio do software ImageJ.

Variação de processo		Modo de corrente	Diâmetro do ponto (mm)	Penetração do ponto (mm)
GAP	0,87mm	Corrente Constante	3,92	1,13
		Corrente Adaptativa	4,78	1,24
	1,74mm	Corrente Constante	4,27	1,45
		Corrente Adaptativa	4,57	1,05
	2,61mm	Corrente Constante	3,90	1,45
		Corrente Adaptativa	4,30	1,23
	3,48mm	Corrente Constante	4,06	1,74
		Corrente Adaptativa	4,12	1,73
Presença de adesivo		Corrente Constante	3,14	1,16
		Corrente Adaptativa	4,60	1,19
Presença de resíduo metálico		Corrente Constante	4,58	1,11
		Corrente Adaptativa	4,30	1,10

Os pontos produzidos com corrente constante e com as variações de processo de GAP de 0,87 mm, GAP de 2,61 mm e com a presença de adesivo entre as chapas obtiveram valores de diâmetro inferiores ao mínimo aceitável, logo estes pontos seriam discrepantes. Este resultado indica a melhor eficiência do método de corrente adaptativa para absorver as variações de processo, principalmente a presença de adesivo entre as chapas.

No geral, o método de corrente adaptativa apresentou maiores valores de diâmetro para as mesmas variações de processo que o método tradicional; menos no caso da

presença de resíduo metálico. Este fato pode ser explicado pela possibilidade de maior concentração de partículas no corpo de prova soldado por corrente adaptativa do que no corpo de prova soldado por corrente constante, uma vez que a massa de resíduo não foi medida com precisão no momento da aplicação.

4.2.2 Micrografias

Os resultados das análises de micrografias são apresentados nas figuras 4.13 a 4.24. As análises foram realizadas com objetivo de visualizar porosidades que não foram reveladas nitidamente na macrografia (aumento de 50x de aumento) e avaliar a microestrutura obtida no núcleo fundido (200x de aumento).

Na figura 4.13 é apresentada a micrografia, com aumento de 50x, dos pontos de solda com GAP de 0,87mm entre chapas obtidos por corrente constante, à esquerda, e por corrente adaptativa, à direita.



Figura 4.13 Pontos de solda com GAP de 0,87mm entre chapas, com um aumento de 50x. À esquerda o ponto de solda produzido com corrente constante e à direita o ponto de solda com corrente adaptativa. Presença de microporosidades - pontos pretos- exemplificados pelas setas.

Na figura 4.13 é possível observar a presença de microporosidades nas amostras soldadas por ambos os métodos.

No método de soldagem por corrente constante houve a formação de porosidades tanto na zona fundida quanto na ZAC. Segundo [Furlanetto, 2014] este ponto poderia ser considerado discrepante, pois não atende as especificações quando a localização dos

defeitos - porosidades não são discrepantes quando ocorrem na zona fundida em regiões não próximas da ZAC.

O ponto soldado por corrente adaptativa também apresentou porosidades. Algumas na região fundida e uma na interface entre ZAC e zona fundida. Pelo mesmo critério discrepância aplicado ao ponto por corrente constante, o ponto por corrente adaptativa também não seria aceitável.

Considerando-se as dimensões irrelevantes e o formato quase esférico dos defeitos encontrados em relação ao tamanho da lentilha de solda estas discrepâncias poderiam ser desconsideradas se não afetassem as propriedades mecânicas do ponto. Para esta avaliação seria necessário um ensaio de tração para averiguar quanto ao efeito de nucleação de trincas nestas porosidades.

As microestruturas destes dois pontos com variação de GAP de 0,87 mm são apresentadas na figura 4.14. Pela análise é possível observar a formação de martensita - regiões escuras, como exemplificado pela seta - em uma matriz ferrítica - regiões claras-.

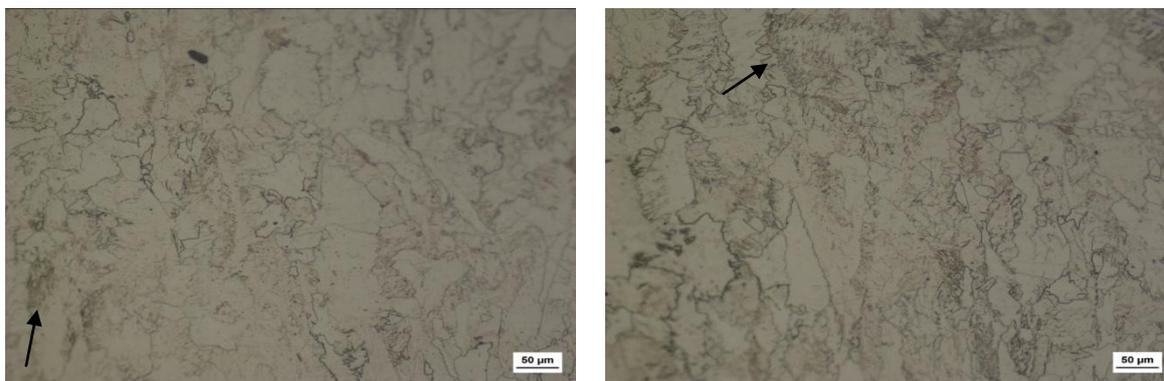


Figura 4.14 Pontos de solda com GAP de 0,87mm entre chapas, com um aumento de 200x na região do núcleo fundido. À esquerda o ponto de solda produzido com corrente constante e à direita o ponto de solda com corrente adaptativa. Formação da martensita exemplificada pelas setas.

Na figura 4.15 é apresentada a micrografia, com aumento de 50x, dos pontos de solda com GAP de 1,74mm entre chapas obtidos por corrente constante, à esquerda, e por corrente adaptativa, à direita. Pode-se observar uma pequena porosidade no ponto soldado com corrente constante. Este defeito seria aceitável, uma vez que se encontra na zona fundida e possui dimensões irrelevantes em relação à zona fundida. Não foram detectadas porosidades no ponto com corrente adaptativa.

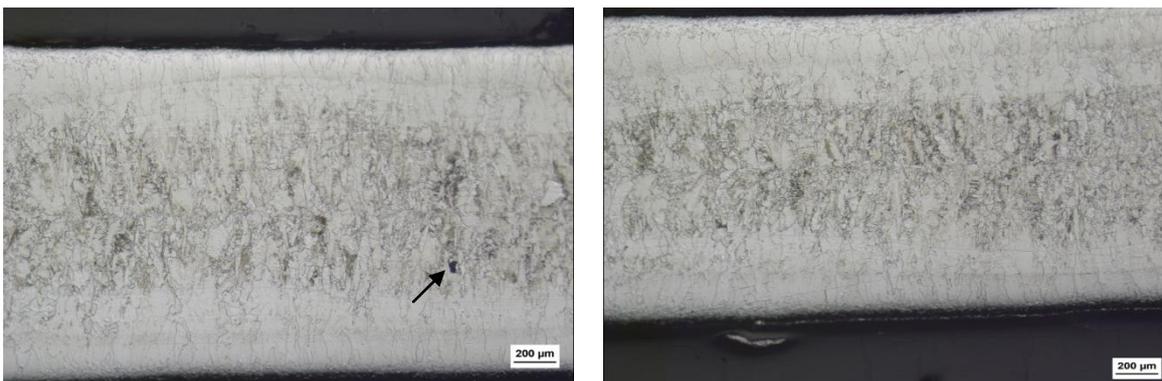


Figura 4.15 Pontos de solda com GAP de 1,74mm entre chapas, com um aumento de 50x. À esquerda o ponto de solda produzido com corrente constante e à direita o ponto de solda com corrente adaptativa. Presença de microporosidade - ponto preto- indicada pela seta.

Na figura 4.16 são apresentadas as micrografias da zona fundida dos pontos com variação de 1,74mm de GAP, com aumento de 200x. Pela análise é possível observar a formação de martensita -regiões escuras, como exemplificado pela seta- em uma matriz ferrítica - regiões claras-.

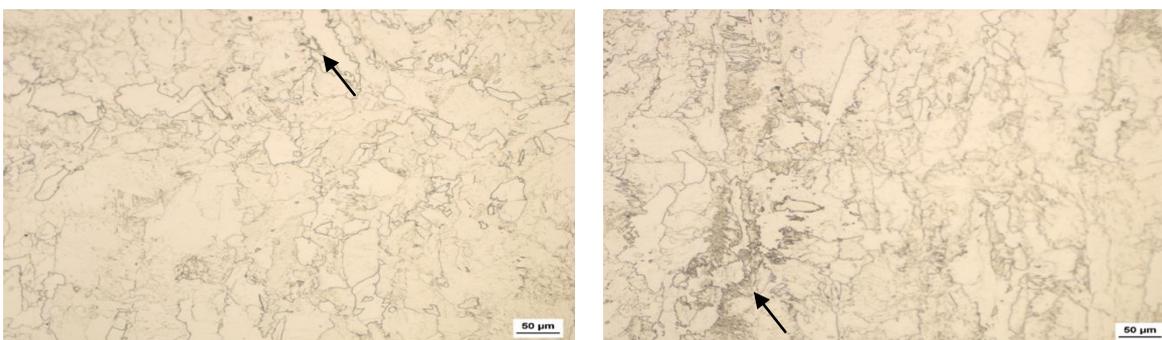


Figura 4.16 Pontos de solda com GAP de 1,74mm entre chapas, com um aumento de 50x. À esquerda o ponto de solda produzido com corrente constante e à direita o ponto de solda com corrente adaptativa. Formação da martensita exemplificada pelas setas.

Na figura 4.17 é apresentada a micrografia, com aumento de 50x, dos pontos de solda com GAP de 2,61mm entre chapas obtidos por corrente constante, à esquerda, e por corrente adaptativa, à direita. Lembrando que no ponto com GAP de 2,61mm soldado com corrente contínua foi observado uma porosidade no ensaio de macrografia.

A micrografia comprovou o resultado da macrografia: na amostra com corrente constante houve a formação de grandes poros no núcleo fundido e ZAC do ponto soldado. Dadas as localizações e dimensões destes defeitos este ponto não seria aceitável.

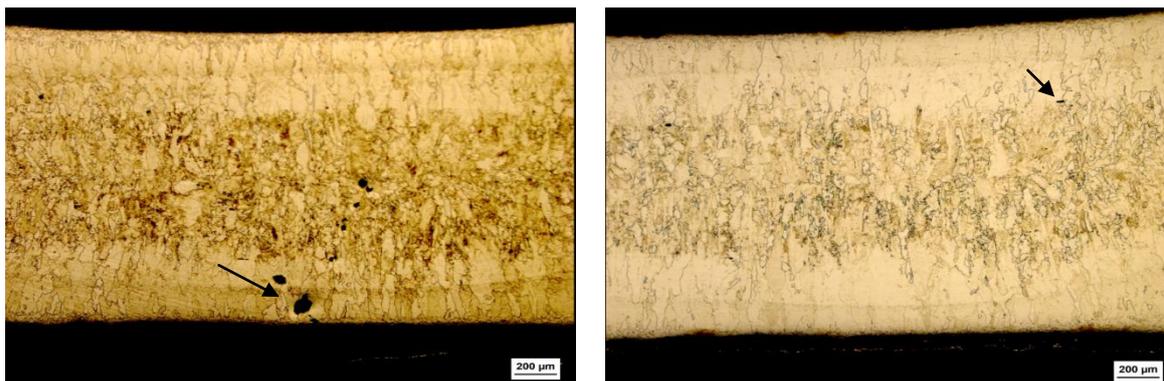


Figura 4.17 Pontos de solda com GAP de 2,61mm entre chapas, com um aumento de 50x. À esquerda o ponto de solda produzido com corrente constante e à direita o ponto de solda com corrente adaptativa. Presença de microporosidades - pontos pretos- exemplificados pelas setas. Poros discrepantes para a corrente soldagem com corrente contínua.

No ponto com corrente adaptativa notam-se pequenos poros. Os defeitos estão concentrados na região superior do ponto, na interface da zona fundida e da ZAC. A discrepância deste ponto não é completamente justificável, considerando-se as dimensões dos poros e formatos. Trata-se da mesma discussão para a amostra com GAP de 0,87 mm. Seria necessário um ensaio de tração para determinar a real discrepância destas porosidades.

Na figura 4.18 são apresentadas as micrografias da zona fundida dos pontos com variação de 2,61mm de GAP, com aumento de 200x.

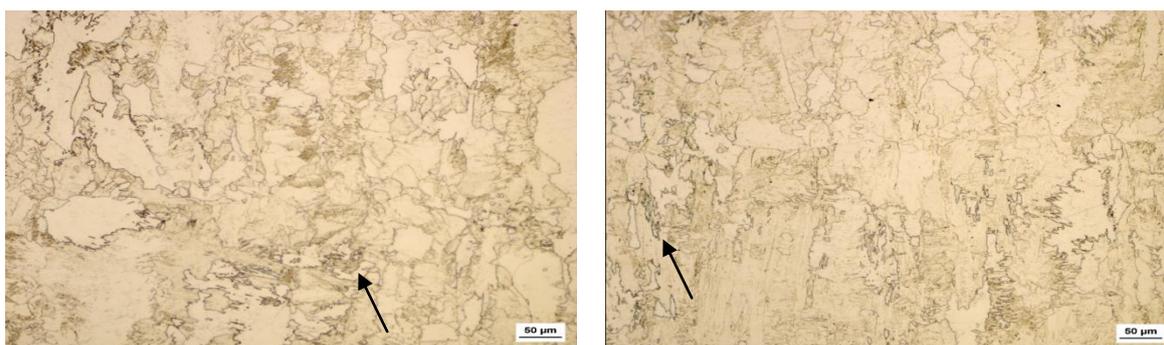


Figura 4.18 Pontos de solda com GAP de 2,61mm entre chapas, com um aumento de 200x. À esquerda o ponto de solda produzido com corrente constante e à direita o ponto de solda com corrente adaptativa. Formação da martensita exemplificada pelas setas.

Pela análise é possível observar a formação de martensita -regiões escuras, como exemplificado pela seta- em uma matriz ferrítica - regiões claras-.

Na figura 4.19 é apresentada a micrografia, com aumento de 50x, dos pontos de solda com GAP de 3,48 mm entre chapas obtidos por corrente constante, à esquerda, e por corrente adaptativa, à direita.

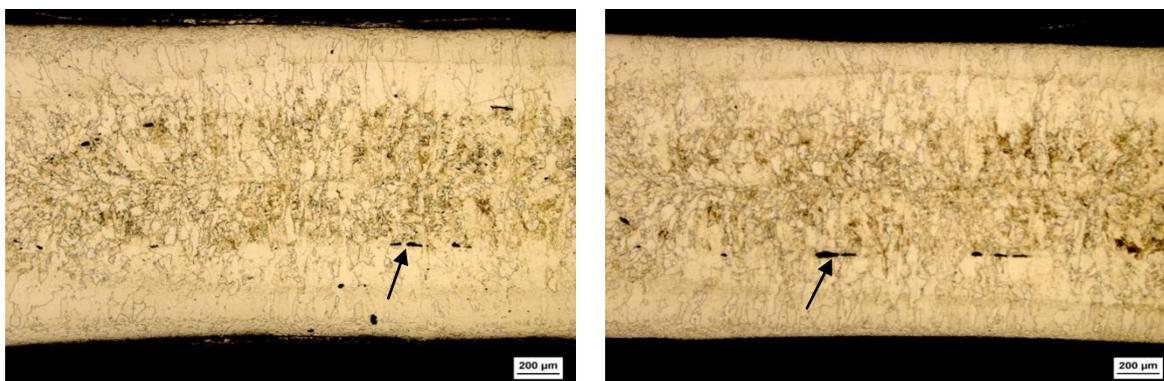


Figura 4.19 Pontos de solda com GAP de 3,4mm entre chapas, com um aumento de 50x. À esquerda o ponto de solda produzido com corrente constante e à direita o ponto de solda com corrente adaptativa. Presença de microporosidades - pontos pretos- exemplificados pelas setas. Poros discrepantes para ambos os métodos.

Para este valor de GAP entre chapas é notável a formação de poros nos corpos de prova soldados com ambos os métodos. Os defeitos observados estão localizados, em sua grande maioria, nos arredores do botão de solda - interface com a ZAC- além de terem dimensões alongadas e com a presença de ângulos fechados nas bordas o que facilitaria o princípio de uma trinca.

Dada à localização, dimensões e formatos destes defeitos, tanto o ponto com corrente constante quanto o ponto com corrente adaptativa seriam discrepantes.

Na figura 4.20 são apresentadas as micrografias da zona fundida dos pontos com variação de 3,48mm de GAP, com aumento de 200x. Pela análise é possível observar a formação de martensita -regiões escuras, como exemplificado pela seta- em uma matriz ferrítica - regiões claras-.

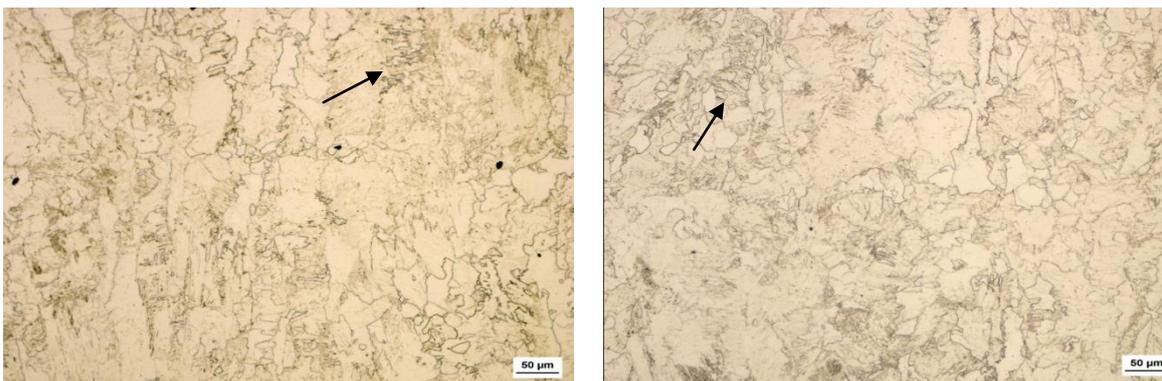


Figura 4.20 Pontos de solda com GAP de 3,48mm entre chapas, com um aumento de 200x. À esquerda o ponto de solda produzido com corrente constante e à direita o ponto de solda com corrente adaptativa. Formação da martensita exemplificada pelas setas.

Na figura 4.21 é apresentada a micrografia, com aumento de 50x, dos pontos de solda com a presença de adesivo entre chapas obtidos por corrente constante, à esquerda, e por corrente adaptativa, à direita.

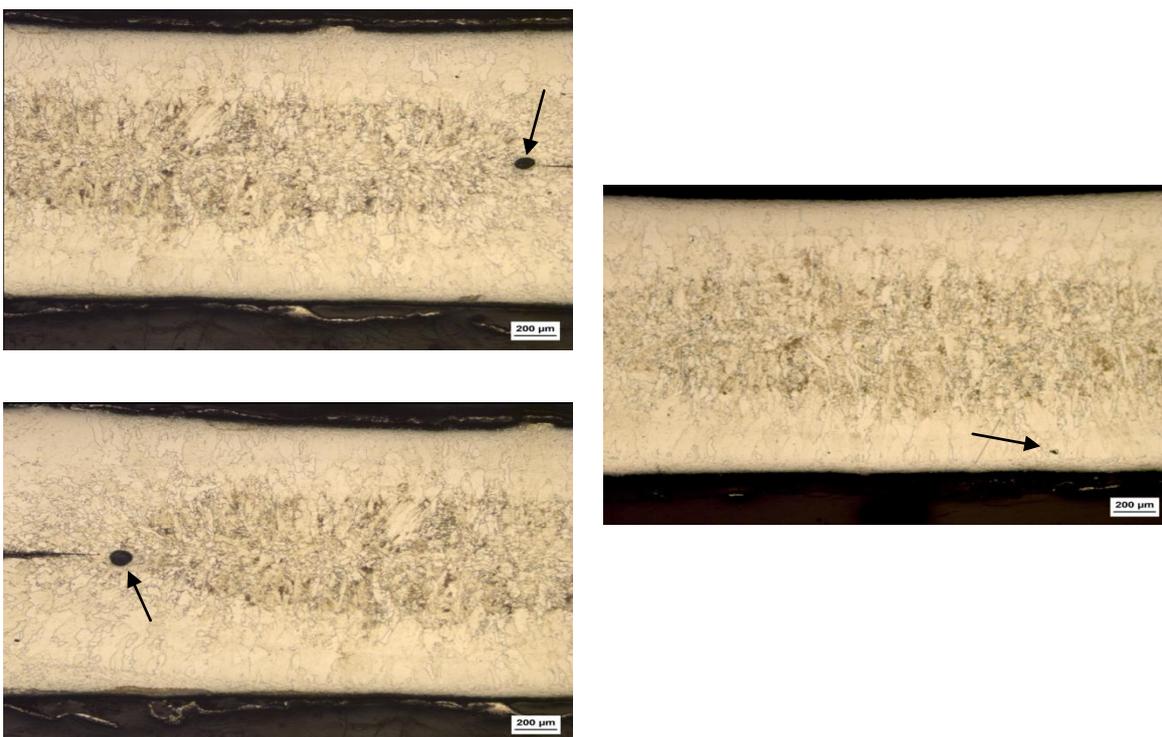


Figura 4.21 Pontos de solda com a presença de adesivos entre chapas, com um aumento de 50x. À esquerda o ponto de solda produzido com corrente constante e à direita o ponto de solda com corrente adaptativa. Presença de microporosidades - pontos pretos- exemplificados pelas setas. Poros discrepantes para a soldagem com corrente contínua.

No ponto soldado com corrente constante houve a formação de duas grandes porosidades. Lembrando que para o ponto com esta variação de processo soldado com corrente contínua foi possível visualizar macroporosidades no ensaio de macrografia.

A primeira (na foto superior do lado esquerdo) formou-se na primeira região da ZAC do lado direito do ponto e a segunda (na foto inferior do lado esquerdo) formou-se na interface ZAC - zona fundida. Ambas possuem caráter discrepante em função de sua localização e dimensões, demonstrando ineficiência da soldagem por corrente contínua em situações com adesivo entre chapas.

No ponto soldado com corrente adaptativa é possível observar um pequeno poro na região inferior, na ZAC A discrepância deste ponto não é completamente justificável, considerando-se que houve a formação de apenas um único poro e de dimensões desprezíveis. Para ser confirmado o caráter discrepante deste ponto, como já foi discutido anteriormente, seria preciso uma análise em ensaio de tração.

Na figura 4.22 são apresentadas as micrografias da zona fundida dos pontos com a presença de adesivo entre as chapas, com aumento de 200x. Para os dois modos pode-se observar a formação de martensita -regiões escuras, como exemplificado pela seta- em uma matriz ferrítica - regiões claras-.

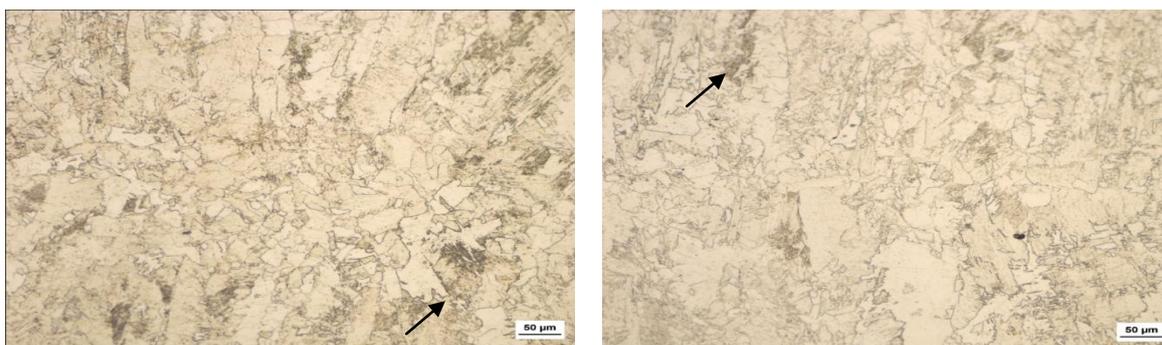


Figura 4.22 Pontos de solda com a presença de adesivos entre chapas, com um aumento de 200x. À esquerda o ponto de solda produzido com corrente constante e à direita o ponto de solda com corrente adaptativa. Formação da martensita exemplificada pelas setas.

Na figura 4.23 é apresentada a micrografia, com aumento de 50x, dos pontos de solda com a presença de resíduo metálico entre chapas obtidos por corrente constante, à esquerda, e por corrente adaptativa, à direita. À partir desta imagem é possível confirmar o

resultado do ensaio de macrografia, uma vez que no ponto soldado com corrente constante, houve a formação de uma segunda fase no interior da zona fundida.

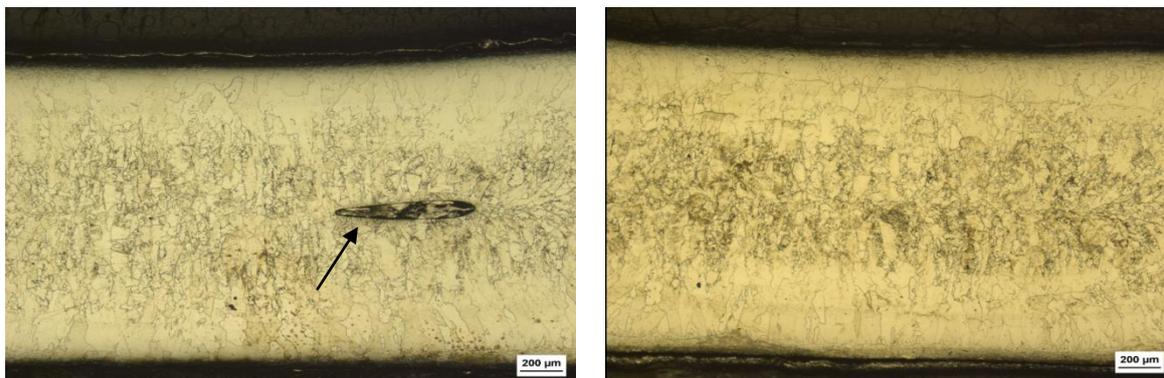


Figura 4.23 Pontos de solda com a presença de resíduo metálico entre chapas, com um aumento de 50x. À esquerda o ponto de solda produzido com corrente constante e à direita o ponto de solda com corrente adaptativa. Presença de segunda fase destacada pela flecha.

Esta segunda fase pode ser associada à ineficiência da soldagem com corrente adaptativa em realizar pontos de boa qualidade com a presença de resíduos metálicos entre as chapas. Este precipitado possui dimensões alongadas, comprimento extenso e bordas em angulo, podendo ocasionar a nucleação de trincas.

Não houve a formação de segunda fase no modo de soldagem por corrente adaptativa, demonstrando a eficiência das adaptações de corrente.

Na figura 4.24 são apresentadas as micrografias da zona fundida dos pontos com a presença de adesivo entre as chapas, com aumento de 200x.

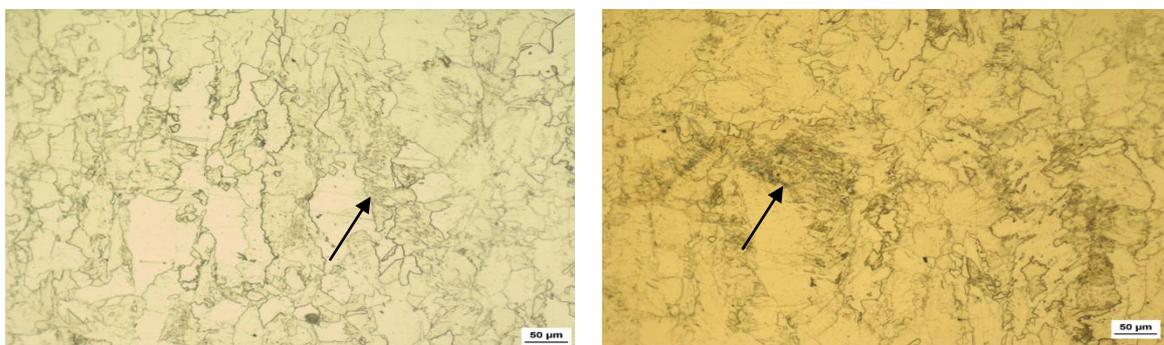


Figura 4.24 Pontos de solda com a presença de resíduo metálico entre chapas, com um aumento de 200x. À esquerda o ponto de solda produzido com corrente constante e à direita o ponto de solda com corrente adaptativa. Formação da martensita exemplificada pelas setas.

Para os dois modos observou-se a formação de martensita -regiões escuras, como exemplificado pela seta- em uma matriz ferrítica - regiões claras-.

Pela formação de martensita, espera-se uma elevação na microdureza na região fundida do ponto de solda, em comparação com as demais regiões. Esta microdureza será responsável por garantir a resistência mecânica necessária do ponto de solda. Pela proporção entre as fases formadas, é esperada uma elevação de dureza no núcleo do ponto, mas esta elevação não será tão expressiva, uma vez que a matriz ferrítica é bem volumosa. A proporção entre as fases é coerente com a composição química do aço utilizado, uma vez que o teor de carbono do material utilizado era extremamente baixo, esperava-se uma matriz ferrítica em grande proporção.

Quanto a formação de microporosidades nos corpos de prova soldados com a corrente adaptativa: apesar de não terem sido consideradas discrepantes, a existência destes pequenos defeitos indica uma deficiência do equipamento. Ajustes no tempo de solda seriam capazes de eliminar estas microporosidades, conforme foi ilustrado anteriormente na figura 2.9, que apesar de representar a má formação da lentilha de solda, possui microporosidades na metade do tempo adequado de soldagem e com o tempo adequado de processo não são evidenciadas estes defeitos. Desta maneira o equipamento de soldagem por corrente adaptativa mostrou não ser completamente eficaz na não-geração de defeitos. Entretanto alguma configuração extra de adaptação no tempo de soldagem poderia ser explorada para resolver a presença destas microporosidades.

4.2.3 Perfis de microdureza

Nas figuras 4.25 a 4.30 são apresentados os perfis de microdureza Vickers obtidos para os corpos de provas. As indentações foram realizadas com uma carga de 0,1kg. Todos os corpos de prova apresentaram comportamentos similares no ensaio de microdureza, resultado coerente com os obtidos nas imagens de microestruturas. Os valores máximos de dureza nos corpos de prova estão entre 190 e 210 Vickers.

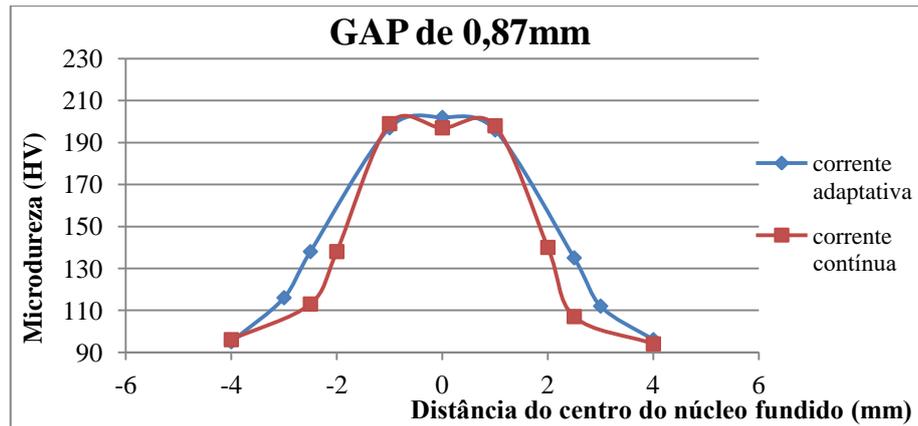


Figura 4.25 Perfil de microdureza dos corpos de prova com GAP de 0,87mm entre as chapas.

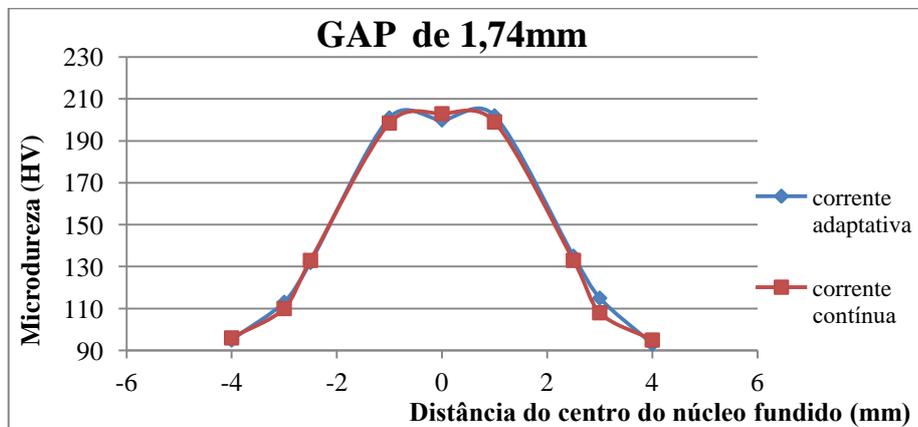


Figura 4.26 Perfil de microdureza dos corpos de prova com GAP 1,74mm entre as chapas.

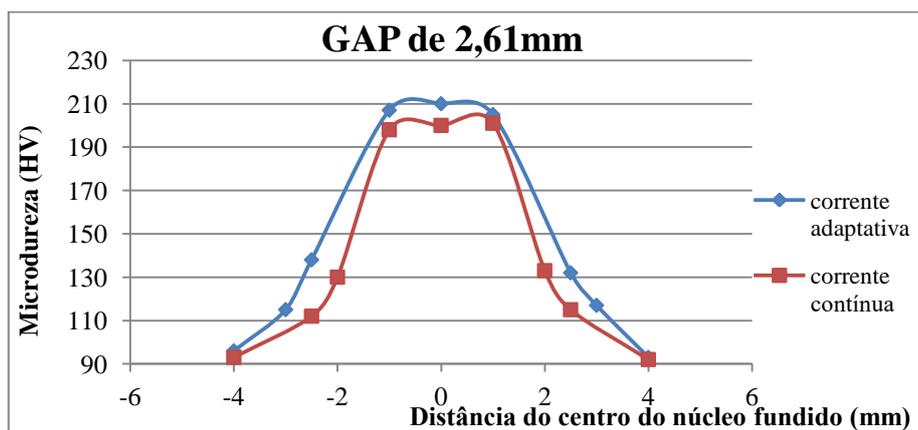


Figura 4.27 Perfil de microdureza dos corpos de prova com GAP de 2,61mm entre as chapas.

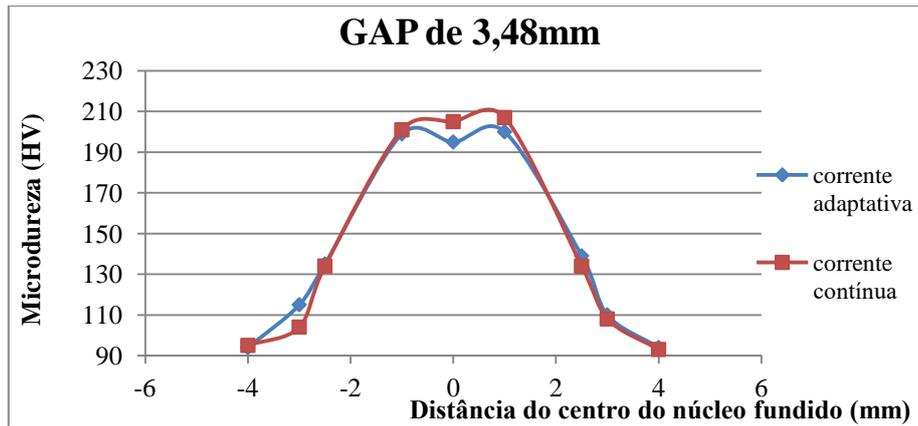


Figura 4.28 Perfil de microdureza dos corpos de prova com GAP de 3,48mm entre as chapas.

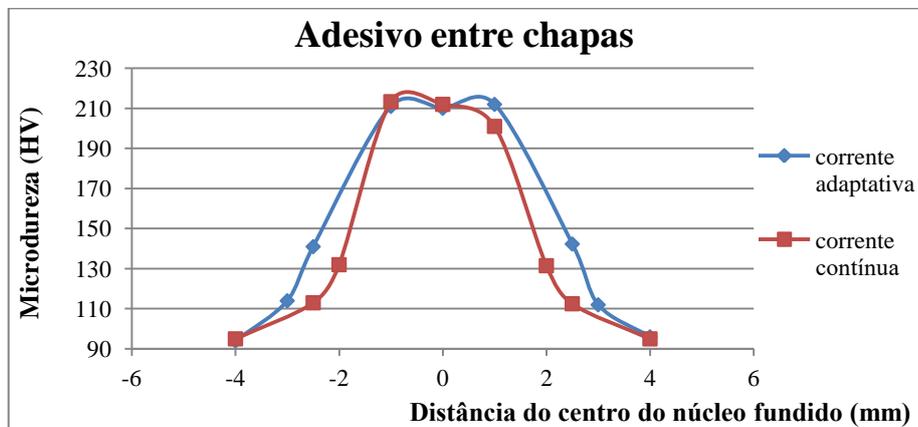


Figura 4.29 Perfil de microdureza dos corpos de prova com a presença de adesivo entre as chapas.

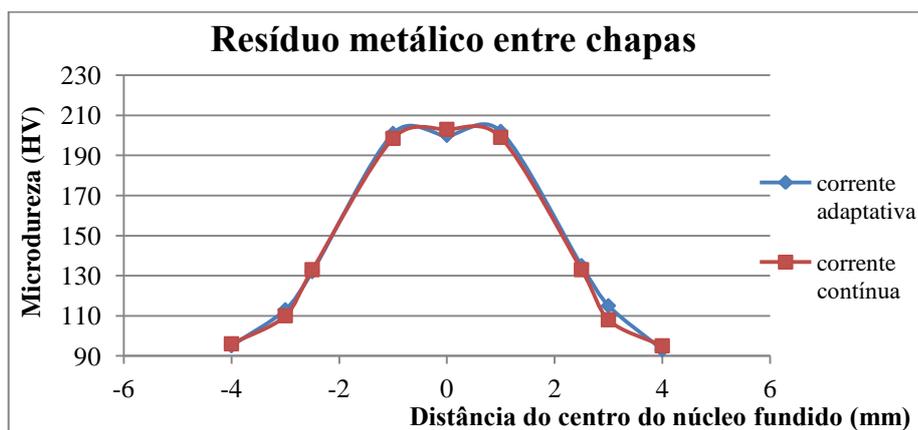


Figura 4.30 Perfil de microdureza dos corpos de prova com resíduo metálico entre as chapas.

Os valores obtidos para a dureza do metal base em regiões mais distantes do núcleo fundido (distância > 3mm) são, praticamente, os mesmo para todos os corpos de prova, uma vez que todos foram estruturados com chapas de aço de mesmo composição química e mesmo lote de produção. Não foi possível observar grandes variações na dureza da ZAC entre o método adaptativo e o método convencional. Os valores diferenciados no eixo X nas figuras 4.24, 4.26 e 4.28 são relativos aos pontos com diâmetros reduzidos soldados por corrente constante (pontos menores tem a ZAC mais próxima do núcleo fundido).

Apenas nos corpos de prova com GAP de 2,61 mm e GAP de 3,48 mm é possível visualizar uma diferença razoável entre as durezas obtidas com os dois métodos na zona fundida. Para o GAP de 2,61mm a soldagem adaptativa obteve valores maiores e para o GAP de 3,48mm a soldagem por corrente contínua atingiu melhores resultados. O restante dos corpos de prova apresentou valores máximos muito similares. Por estas razões, não foi possível determinar a superioridade de um método frente ao outro quanto ao ensaio de microdureza.

As microdurezas obtidas nos ensaios demonstram a influência da matriz ferrítica, uma vez que o valor de microdureza para os núcleos fundidos das amostras não serem extremamente elevados. Assim, é possível que os pontos de solda ensaiados fraturem de maneira interfacial, com a propagação de uma trinca pela zona fundida.

Entretanto, com a presença de defeitos internos em alguns dos pontos de solda e sem um ensaio de tração é complicado inferir sobre o modo de falha.

5 CONCLUSÕES

Pelas curvas de resistência dinâmica apresentadas, observou-se a funcionalidade do sistema adaptativo em responder as leituras de resistência dinâmica bem como concluir que não houve expulsão de material de nenhum dos pontos de solda produzidos; assim não foi possível relacionar a presença de variáveis de processo com a expulsão de material, bem como avaliar a eficácia do *feedback* adaptativo em evitar expulsões.

Com as análises de macrografia observou-se a influência das variações de processo no diâmetro do ponto de solda, uma vez que nenhum dos pontos obteve o diâmetro da referência utilizada. Os pontos de solda produzidos com a corrente adaptativa obtiveram valores mais próximos da referência do que os pontos utilizando a corrente constante.

Através das análises de micrografia foram observados defeitos em ambos os modos de soldagem, mostrando a influência das variáveis de processo simuladas na geração de defeitos em pontos de solda. Com a corrente contínua houve a formação de macroporosidades discrepantes, precipitação de segunda fase no núcleo fundido e microporosidades não discrepante. Com a corrente adaptativa houve a formação de microporosidades não discrepantes e microporosidades discrepantes para o caso de GAP de 3,4 mm entre chapas. Este resultado demonstra a superioridade do método com adaptação de corrente, mas também expõe pontos a serem melhorados, uma vez que as microporosidades poderiam ser evitadas com ajustes no tempo de solda.

O ensaio de microdureza mostrou resultados muito semelhantes entre os dois métodos, além de uma baixa dureza do núcleo fundido. As microdurezas obtidas, juntamente com a presença de microporosidades indicam uma tendência a fratura interfacial como modo de falha dos pontos produzidos. Para determinar-se a superioridade de um método frente ao outro quanto a resistência dos pontos soldados e modo de falha, tornou-se necessário um ensaio de tração.

A utilização da corrente adaptativa mostrou ser de interessante para implementação no caso de variações de processo como GAP's, presença de adesivo e presença de resíduos

metálicos. Uma vez que seu desempenho foi superior ao da soldagem com corrente contínua em praticamente todas as variações, produzindo, de maneira geral, pontos com melhores dimensões e menor quantidade de defeitos internos. A limitação do uso mostrou-se no GAP de 3,4 mm entre chapas, onde os ajustes nos parâmetros foram insuficientes e houve a formação de defeitos discrepantes.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Realização de ensaios de tração para avaliar a resistência mecânica e o modo de fratura verdadeiro dos pontos de solda produzidos com ambos os métodos.

Estruturar corpos de prova com aços de diferentes regiões da carroceria, variando, assim, os teores de elementos de liga e as propriedades mecânicas e os tipos de aços utilizados para analisar possíveis influências dos métodos nos valores de microdurezas e dimensões dos pontos.

Alterar os valores de corrente e força de fechamento para gerar expulsões de material e avaliar a eficiência da adaptação de corrente em conter este tipo de defeito.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Amaral, F.F. **Monitoramento da Qualidade na Soldagem a Ponto por Resistência Elétrica de Chapas de Aço Galvanizadas Baseado em Análise de Experimentos** - Dissertação (mestrado) Engenharia de produção - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2011.

ARDUIN, J.P.S. **Influências da Temperatura e da Vazão de Água no Resfriamento dos Eletrodos Utilizados no Processo de Soldagem por Resistência Elétrica**, 23pg. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

AWS, **Welding Handbook, volume 2 - Welding Processes** - Oitava edição, 1991.

Batista, M. **Estudo comparativo da soldabilidade de chapas para indústria automobilística utilizando dois equipamentos de soldagem a ponto por resistência**. 194 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica de São Paulo, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. ed. rev - São Paulo, 2011.

Chen, J. **Fundamental studies for development of real-time modelbased feedback control with model adaptation for small scale resistance spot welding**. Dissertation - Ohio State University, 2005.

Chertov, A.M.; **Development of the New Physical Method for Real Time Spot Weld Quality Evaluation Using Ultrasound**. Dissertation - University of Windsor - Windsor, Ontario, Canada, 2007.

Furlanetto, V. **Desenvolvimento e instrumentação de um cabeçote de solda a ponto por resistência elétrica para aplicação em condições industriais**. 280 p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos. versão corr. - São Paulo, 2014.

Gorni, A. A. **Aços avançados de alta resistência: microestrutura e propriedades mecânicas.** Revista Corte e Conformação de Metais - Dezembro de 2008.

<http://www.cbmm.com.br/br/p/53/acos-automotivos-.aspx> - site visitado em 06/02/2016.

Kwietniewski, C. E. F., Kiss, F. J. **Metalografia e tratamentos térmicos de aço e ferros fundidos.** Porto Alegre: gráfica UFRGS - 3ª edição, 2011.

Machado, I. G. **Soldagem e técnicas conexas: processos** - Porto Alegre: editado pelo autor, 1996.

Nakano, R.K. **Influência da taxa de deformação na falha de uniões por solda a ponto** 75 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos - edição revisada - São Paulo, 2005.

Nascimento, V. C. **Seleção de parâmetros de soldagem a ponto por resistência, baseado na medição da resistência elétrica entre chapas.** 130 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia - Uberlândia, MG, 2008.

Nasir, Z.; Pandey, A.K.; Khan, M. I. **Resistance spot welding and Optimisation techniques used to optimise its process parameters** - International Journal of Technical Research and Applications, Volume 4, (Janeiro-Fevereiro, 2016), PP. 50-55.

Perini, F.G. **Propriedades mecânicas e microestruturais de aços de alta resistência e baixa liga soldados.** Dissertação (Mestrado) - Programa De Pós-Graduação em Materiais, Universidade De Caxias Do Sul - Caxias do Sul, 2008.

Pinheiro, H.J.G. **estudo da correlação entre a corrente de “shunt” e a geometria do ponto de solda em função do espeçamento, em chapa de aço de baixo teor de carbono e espessura de 0,8 mm.** Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Tecnologia SENAI Cimatec, Gestão e Tecnologia Industrial - Salvador 2011.

Pintor Junior, M.A. **Avaliação das juntas soldadas utilizando o processo de soldagem a ponto na indústria automobilística.** Revista Técnico-Científica do CREA-PR - ISSN 2358-5420 - 2ª edição - setembro de 2014.

Podrzaj, P.; Jerman, B.; Simoncic, S. **Poor fit-up condition in resistance spot welding** - Faculty of Mech. Eng., Univ. of Ljubljana, Slovenia. Journal of Materials Processing Technology (2016) p. 21–25.

Podrzaj, P.; Polajnar, I.; Diaci, J.; Kariz, Z. **Estimating the strength of resistance spot welds based on sonic emission**. Artigo publicado na Science and Technology of Welding & Joining- Junho de 2005.

Pouranvari, M. et al. **Metallurgical Factors Affecting Failure Mode of Resistance Spot Welds** - Artigo, Janeiro de 2008.

Pouranvari, M.; Marashi, P. **Resistance Spot Welding of Unequal Thickness Low Carbon Steel Sheets**. Artigo publicado na Advanced Materials Research - Dezembro de 2009.

Pouranvari, M.; Marashi, S.P.H.; Mousavizadeh, S.M. **Failure mode transition and mechanical properties of similar and dissimilar resistance spot welds of DP600 and low carbon steels** - Artigo publicado na Science and Technology of Welding & Joining - Setembro de 2010.

Rossi, G. P. **Estudo de correlação do comportamento de pontos de solda em corpos de prova pelo método de elementos finitos**. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - São Paulo 2007.

Ruiz, D. C.; Batalha, G. F. **Desenvolvimento de critério de falha de solda a ponto para a montagem de carrocerias automobilísticas**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos, (200?).

Ruiz, D. C.; Batalha, G. F. **Estudo de um critério de modo de falha para solda a ponto por resistência**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos, (200?).

Salem, Meranda. **Control and Power Supply for Resistance Spot Welding (RSW)**. (2011). Electronic Thesis and Dissertation Repository. Paper 130.

Sampaio, D.J.B.S. **Automação do monitoramento da qualidade do processo de solda a ponto resistiva**. 173 f. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

Simoncccic, S, Podrzaj, P. **Resistance spot weld strength estimation based on electrode tip displacement/velocity curve obtained by image processing**. Artigo publicado na Science and Technology of Welding & Joining - Agosto de 2014.

Stocco, D. **Caracterização de solda por resistência a ponto através de avaliações não destrutivas**. 110 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos - edição revisada - São Paulo, 2010.

Stocco, D.; Gonçalves, R. **Caracterização dos defeitos encontrados em solda a Ponto utilizando a técnica do ultra-som, apoiado à exames metalográficos**. PANNDT, Rio de Janeiro - RJ, 2003.

Vargas, J. E.; Alfaro, S. C. A.; Vilarinho, L. O. **Estudo da influência dos parâmetros na geometria e resistência mecânica do ponto na soldagem a ponto por resistência utilizando planejamento robusto** - ° POSMEC. FEMEC/UFU, Uberlândia-MG, 2006.

Vongler, M. **Investigation of Resistance spot weld formation**. Dissertation - Department Of Mechanical Engineering, Stanford University - Dezembro de 1992.

Zeng, C. **Development of a Condition Monitoring and Diagnostic System for Robotic Resistance Spot Welding**. Dissertation -Queen's University - Kingston, Ontario, Canada - Setembro, 2004.

Zhou, K. **Development of an Online Quality Control System for Resistance Spot Welding** - Thesis - Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong - Dezembro de 2012.

Zhou, M.; Hu, S.; Zhang, H. **Critical specimen sizes for tensile-shear testing of steel sheets: Strength measurement of spot welds depends both weld quality and testing specimens**. Welding Journal, American welding Society, p. 305s-313s, set. 1999.

Wainer, E. **Soldagem: processos e metalurgia**/ coordenação Emílio Wainer, Sérgio Duarte Brandi, Fábio Décourt Homem de Mello - São Paulo: Blucher, 1992.