

JULIO CÉSAR RISÉRIO MOURA

**Solda a ponto “one-side” utilizando arco Plasma: aplicação em peças de carroceria
automotiva**

São Caetano do Sul

2013

Julio César Risério Moura

**Solda a ponto “one-side” utilizando arco Plasma: aplicação em peças de carroceria
automotiva**

Estudo de caso apresentado ao programa de pós-graduação em Engenharia de Soldagem do Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, como parte dos requisitos para obtenção do certificado de Especialista.

Orientador: Prof. Loriel Vilarinho

São Caetano do Sul

2013

Moura, Julio César Risério

Aplicação da solda a ponto “one-side” com arco plasma para aplicação em peças de carroceria automotiva: um estudo de caso. / Julio César Risério Moura. São Caetano do Sul, SP: CEUN-CECEA, 2013.

60p.

Estudo de caso — Especialização em Engenharia de Soldagem. Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, São Caetano do Sul, SP, 2013.
Orientador: Prof. Louriel Vilarinho

1. Soldagem 2. One-side 3. Plasma I. Moura, Julio César Risério. II. Instituto Mauá de Tecnologia. Centro Universitário. Centro de Educação Continuada. III. Título.

DEDICATÓRIA

Agradeço a minha esposa Fernanda ao apoio incondicional e aos meus filhos Gustavo e Gabriela pela compreensão.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Louriel Vilarinho pela orientação e permissão pela utilização do laboratório da Universidade Federal de Uberlândia e aos engenheiros do laboratório Diandro Bailoni Fernandes e Thonson Ferreira Costa. Um agradecimento especial também para o engenheiro Valdir Berloff pelas conhecimentos nas análises macrográficas.

RESUMO

Dentre os diversos itens relacionados à indústria automobilística, a sociedade cobra constantemente diversas contrapartidas com relação ao impacto ambiental, segurança e preço final competitivo dos produtos. A diminuição de massa dos veículos correlacionadas com a diminuição de emissões e a constante busca pela diminuição dos custos, em contraponto com o aumento da segurança, são temas atuais exigidos por esta indústria. A soldagem Plasma tem as vantagens de alto aporte de calor, se comparado com outros processos com adição de material, como pode ser considerado um processo com custo mais baixo que a soldagem a laser, e tem mais precisão que a soldagem TIG, por seu arco mais constrito. Como forma de contribuir com estas necessidades, segue estudo de caso de aplicação de solda a ponto em um único lado, onde muitas vezes é utilizada soldagem com adição de material, especialmente na indústria automobilística a soldagem MIG, utilizando as vantagens da soldagem Plasma.

Palavras-chave: Solda a ponto. Soldagem Plasma. One-side. Carroceria.

ABSTRACT

Among the various items related to automotive industry, society exacts constantly various counterparts associated to environmental impact, safety, and competitive prices of final product. The vehicle weight reduction correlated with decreasing emissions and the constant quest for lower costs, in contrast with higher levels of safety, are current required topics by this industry. Plasma welding has the advantage of providing high levels of heat input when compared with other added material processes, and can be considered a lower cost process than laser welding and more precise than TIG, due to his more constricted arc. As a contribution to those demands, following case study of one side spot welding application, as an opportunity to replace added material welding process, especially MIG, often used in automobile industry, using the advantages of Plasma welding.

Keywords: Resistance spot welding. Plasma welding. One-side. Body

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Tendências nos processos de junção em carrocerias automotivas.....	13
Figura 2 - Técnicas de união utilizadas na fabricação de automóveis.....	14
Figura 3 - Ciclo de soldagem.....	15
Figura 4 - Característica do ponto de solda	16
Figura 5 - Esquema das resistências elétricas.....	17
Figura 6 - Ilustração das superfícies de contato	18
Figura 7 - Distribuição da temperatura em uma soldagem por ponto	18
Figura 8 - Distribuição de temperatura em um ponto de solda	19
Figura 9 - Ciclo de soldagem.....	20
Figura 10 - Expulsão do material	21
Figura 11 - Estágios de trabalho da soldagem por resistência.....	23
Figura 12 - Arco Transferido e não transferido	25
Figura 13 - Diferenciação básica entre os processos TIG e Plasma.....	25
Figura 14 - Distribuição do calor.....	26
Figura 15 - Processo TIG e Plasma	27
Figura 16 - Diferenças de temperatura entre os processos TIG e Plasma	28
Figura 17 - Solda a ponto Plasma.....	29
Figura 18 - Esquema equipamento soldagem plasma	29
Figura 19 - Sequência de soldagem a ponto por plasma	30
Figura 20 - Soldagem a plasma automatizada	30
Figura 21 - Parâmetros para soldagem	33
Figura 22 - Montagem da peça no dispositivo para os testes	35
Figura 23 - Resultados da amostra 1	36
Figura 24 - Testes da amostra 2.....	36

Figura 25 - Testes amostra 3.....	37
Figura 26 - Testes amostra 4.....	37
Figura 27 - Testes de arrancamento.....	38
Figura 28 - Contras do processo de soldagem plasma a ponto (modificado).....	38
Figura 29 - Amostra 7 - soldagem com zinco	40
Figura 30 - Representação fixação das chapas	41
Figura 31 - Resultados com chapa zincada	41
Figura 32 - Evolução das experiências de tempo de corrente	43
Figura 33 - Resultados testes espessura 1,8mm	43
Figura 34 - Diâmetro ponto CHAPA A.....	44
Figura 35 - Diâmetro ponto CHAPA B	44
Figura 36 - Diâmetro ponto CHAPA C	45
Figura 37 - Metalografia CHAPA A	46
Figura 38 - Região do metal-base CHAPA A	46
Figura 39 - Zona afetada pelo calor CHAPA A	47
Figura 40 - Zona fundida CHAPA A.....	48
Figura 41 - Poros na zona fundida CHAPA A	48
Figura 42 - Metalografia CHAPA B	49
Figura 43 - Metal-base CHAPA B	50
Figura 44 - Zona de transição CHAPA B.....	50
Figura 45 - Zona fundida CHAPA B.....	51
Figura 46 - Poros na CHAPA B	52
Figura 47 - Indentação CHAPA B.....	52
Figura 48 - Metalografia CHAPA C	53
Figura 49 - Metal-base CHAPA C	54
Figura 50 - Zona de transição CHAPA C.....	54

Figura 51 - Zona fundida CHAPA C.....	55
Figura 52 - Opções de aplicação de soldagem por um lado	56
Figura 53 - Possibilidade de diminuição de massa.....	56

SUMÁRIO

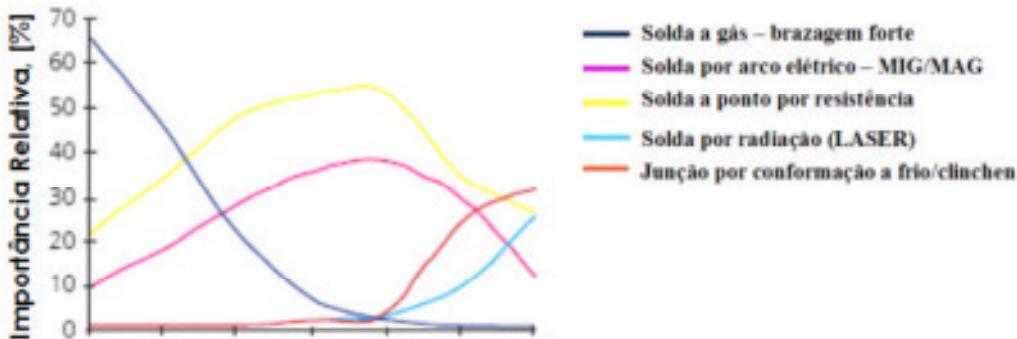
1	INTRODUÇÃO.....	13
2	REFERENCIAIS TEÓRICOS	15
2.1	SOLDAGEM A PONTO POR RESISTÊNCIA.....	15
2.1.1	Princípios de funcionamento	15
2.1.2	Resistências elétricas na soldagem por resistência	17
2.1.3	Resistência de contato.....	17
2.1.4	Distribuição da temperatura no ciclo de soldagem	18
2.1.5	Efeito dos parâmetros no ciclo de soldagem.....	20
2.1.6	Tempo de compressão	20
2.1.7	Tempo de soldagem	21
2.1.8	Tempo de subida “upslope”	22
2.1.9	Tempo de corrente máxima	22
2.1.10	Tempo de descida “downslope”	22
2.1.11	Efeito do tempo de retenção.....	23
2.1.12	Outros fatores que influenciam no processo de soldagem a ponto	23
2.2	SOLDAGEM A PLASMA	24
2.2.1	Princípios de funcionamento	24
2.2.2	A formação do arco	25
2.2.3	O efeito da constrição	27
2.2.4	Soldagem a ponto Plasma	28
3	MATERIAIS E MÉTODOS	31
3.1	MATERIAIS E PARÂMETROS	31
3.2	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	34
3.2.1	Experimentos CHAPA A	35
3.2.2	Experimentos CHAPA B.....	38
3.2.3	Experimentos CHAPA C	41
4	APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS.....	44
4.1	PROCEDIMENTOS REALIZADOS	44
4.1.1	Procedimentos metalográfico e macrográfico.....	44
4.2	ANÁLISE DOS RESULTADOS	46
4.2.1	Análise resultados CHAPA A	46

4.2.2	Análise resultados CHAPA B	49
4.2.3	Análise resultados CHAPA C	53
5	CONCLUSÕES	56
6	TRABALHOS FUTUROS	58
7	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	59

1 INTRODUÇÃO

Na união de peças de carrocerias automotivas utilizam-se normalmente a soldagem a ponto resistiva, a soldagem por arco elétrico, a soldagem por radiação, a união por adesivos estruturais e junções por deformação à frio.

Figura 1 - Tendências nos processos de junção em carrocerias automotivas



FONTE: IWU (2005)

Normalmente na construção de carrocerias automotivas a opção primária por união de chapas metálicas é a utilização de soldagem a ponto resistiva, que têm algumas vantagens essenciais, como baixo custo, versatilidade e com possibilidade de automação, grande precisão e repetitividade, além de ótimas propriedades físico-mecânicas, dando liberdade ao engenheiro de fazer construções estruturais diversas.

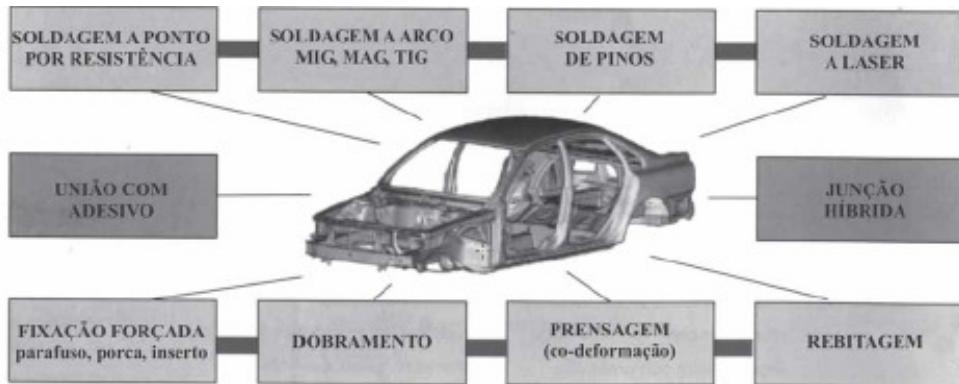
Contudo, dependendo da sequência de produção e das limitações construtivas ou de precisão, existem regiões em que o acesso das pinças de soldagem à ponto não é possível ou acessível, e se faz necessário a utilização de soldagem por arco elétrico, normalmente o processo GMAW¹ (MIG²-MAG³), também podendo ser utilizado outros processos.

¹ Gas Metal Arc Welding

² Metal Inert Gas

³ Metal Active Gas

Figura 2 - Técnicas de união utilizadas na fabricação de automóveis



FONTE: Larsson, J.K. (2011)

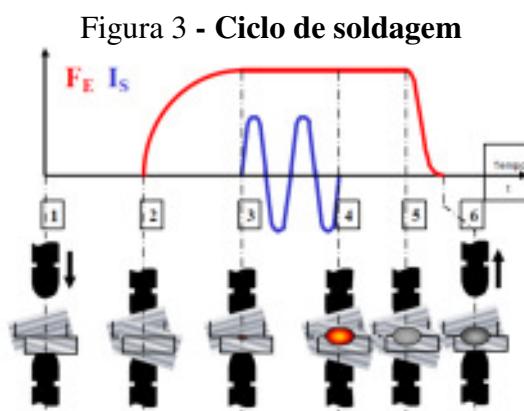
Portanto, o foco deste trabalho é avaliar a possibilidade de utilização de um processo híbrido, que é a utilização de solda a ponto com as vantagens do aporte de calor disponível no processo de soldagem Plasma.

2 REFERENCIAIS TEÓRICOS

2.1 SOLDAGEM A PONTO POR RESISTÊNCIA

2.1.1 Princípios de funcionamento

Segundo (Modenesi & Marques, 2006), a soldagem por resistência faz parte de “um grupo de processos de soldagem nos quais o calor necessário à formação da junta soldada é obtido pela resistência à passagem da corrente elétrica através das peças que estão sendo soldadas. O aquecimento da região da junta pela passagem da corrente elétrica, diminui a resistência mecânica do material, permitindo através da aplicação de pressão, a deformação localizada e, assim, a soldagem por deformação da junta”. Na soldagem a resistência por ponto (RSW⁴) dois eletrodos não consumíveis de vários tipos de liga de cobre, aplicam pressão em chapas sobrepostas enquanto se passa corrente por estes elementos. A relação da corrente elétrica e a resistência ôhmica das peças a serem soldadas, o ciclo de tempo de aplicação de corrente da operação, baseada na Lei de Joule, e a pressão aplicada pelos eletrodos, são as variáveis que definem a qualidade de um ponto de solda ideal. É executada a aplicação de alta corrente elétrica com baixa tensão, com a pressão introduzida antes, durante e depois da operação. Na figura 1 apresenta-se a sequência básica da soldagem a ponto sendo F_E a pressão de soldagem e I_S a corrente de soldagem:

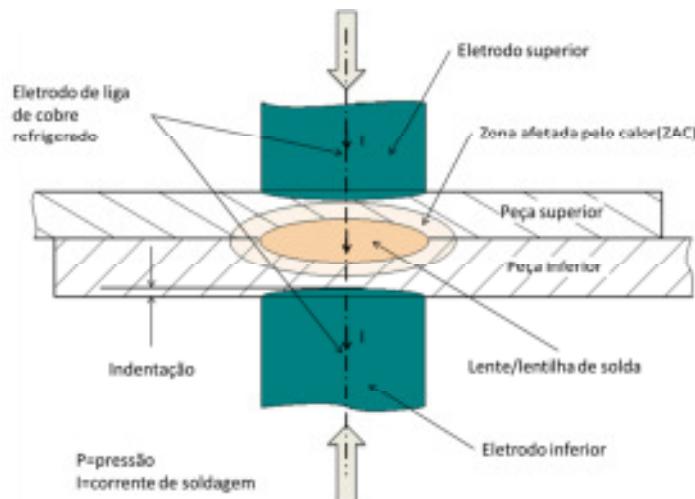


FONTE: Volkswagen (2000)

⁴ RSW – resistance spot welding – soldagem a ponto por resistência

Após a conclusão do ciclo de soldagem, a modificação da estrutura das duas chapas na região afetada pelo calor, após o ciclo de aquecimento e pressão de soldagem, definem o diâmetro e a lenticilha do ponto de solda e suas características de resistência mecânica.

Figura 4 - Características do ponto de solda por resistência



FONTE: O autor

Para se ter o ponto de solda, é necessário uma condição coordenada de trabalho da corrente elétrica e da pressão aplicada. Neste processo de soldagem, todas as resistências elétricas são importantes, devido aos altos valores de corrente de soldagem.

Em um condutor elétrico, a quantidade de calor gerado (*heat input*) depende de três fatores:

1. Corrente elétrica;
2. Resistência do condutor (todos os elementos);
3. Duração total do calor gerado (tempo de soldagem).

Estes três fatores afetam a energia (calor) como na fórmula abaixo:

$$E = I^2 R t \text{ (i)}$$

Onde:

E - calor/energia gerado [J];

I - corrente [A];

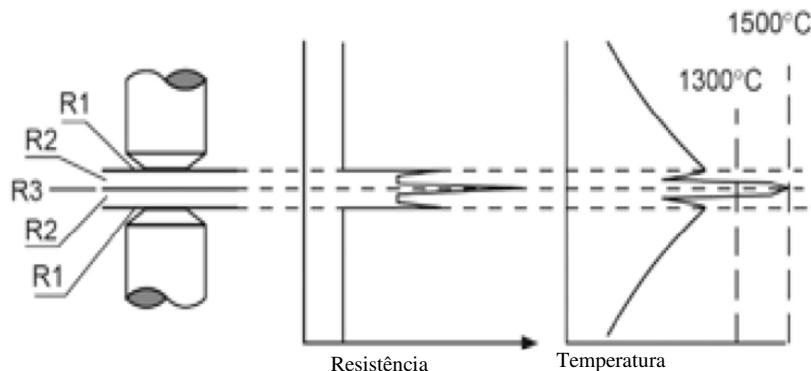
R - resistência [Ohms];

t - tempo[s]

2.1.2 Resistências elétricas na soldagem por resistência

Segundo (Aures, 2006), “na soldagem por resistência o calor gerado é proporcional ao quadrado da corrente de soldagem e diretamente proporcional à resistência e o tempo. Parte do calor gerado é utilizado para gerar a solda e parte é perdida por condução, convecção e radiação para o material de base e eletrodo. A magnitude destas perdas é geralmente desconhecida”.

Figura 5 - Esquema das resistências elétricas



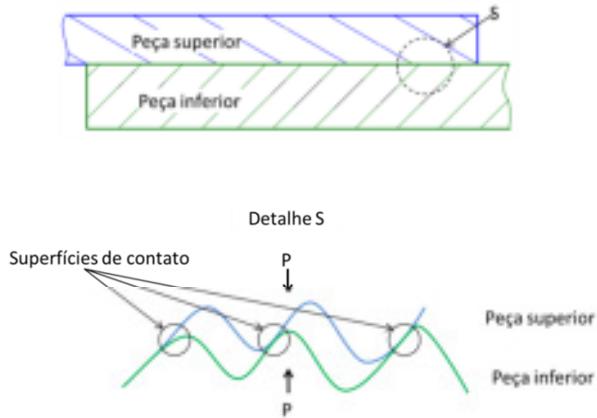
FONTE: Ruuki Co. (2009)

Segundo (Brandi, 2004), “de todas as resistências, R_3 é a mais importante, porque é nesse local que se formará o ponto e, consequentemente, a geração de calor para ocorrer a fusão localizada”. A resistência R_1 também tem sua importância, e devem ter seus valores de resistividade elétrica o mais baixo possível. As resistências R_2 não tem muita influência nos ciclos iniciais de soldagem e sim nos finais.

2.1.3 Resistência de contato

A condição da superfície da peça afeta na resistência de contato e nos valores de resistência alcançados. Microscópicamente, as superfícies a serem soldadas têm deformações dimensionais que afetam a resistência elétrica do ponto de solda. Num primeiro momento, apenas os picos participam da transferência de corrente. Após a deformação dos picos e consequentemente a menor resistência elétrica, permite maior participação de outras regiões na passagem da corrente.

Figura 6 - Ilustração das superfícies de contato



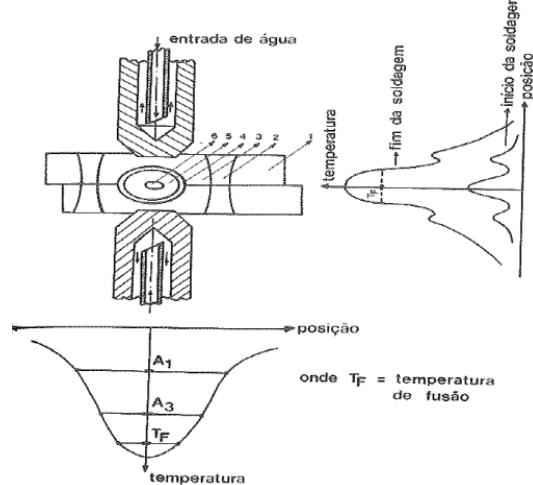
FONTE: o autor

Segundo (Houldcroft, 1977), há correlação entre a resistência de contato, a pressão no eletrodo e a condição da peça a ser soldada.

2.1.4 Distribuição da temperatura no ciclo de soldagem

Segundo (Brandi, 2004), “durante o processo de soldagem existem vários tipos de ciclos com sequências bem diversificadas, como ciclos para pré-aquecimento e pós-aquecimento. Por isto, o conhecimento da distribuição da temperatura na peça e no eletrodo é de fundamental importância”. A figura 7 mostra a distribuição de temperatura na solda a ponto.

Figura 7 - Distribuição da temperatura em uma soldagem por ponto



FONTE: Brandi (2004)

Conforme se observa na figura 7, cada uma das regiões numeradas representa um tipo de transformação metalúrgica:

Região 1 – Metal-base, não afetada;

Região 2 – Zona onde se forma a ferrita⁵ e austenita⁶ no aquecimento, podendo se tornar, no resfriamento, perlita⁷ e martensita⁸, dependendo da velocidade de resfriamento;

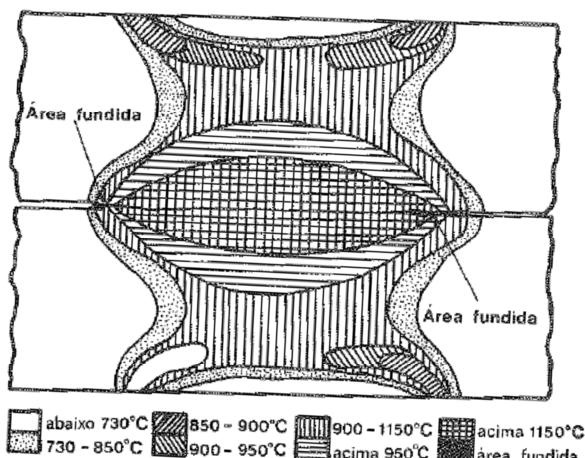
Região 3 – Estando acima de A3, conforme a temperatura atingida, pode ocorrer homogeneização dos grãos de austenita e/ou crescimento de grão. Se o metal-base estiver encruado⁹, poderá haver recristalização¹⁰;

Região 4 – Onde há reações no estado sólido, fusão de carbono e outros elementos;

Região 5 – Zona fundida com formação de grãos equiaxiais;

Região 6 – É o ponto onde tem mais resistência, portanto a maior quantidade de calor.

Figura 8 - Distribuição de temperatura em um ponto de solda



FONTE: Brandi (2004)

⁵ Ferrita: uma solução sólida de carbono (e eventualmente outros elementos) em ferro de estrutura *cúbica de corpo centrado* (CCC) (ferro α).

⁶ Austenita: uma solução sólida de carbono (e eventualmente outros elementos) em ferro, de estrutura *cúbica de face centrada* (CFC) (ferro γ).

⁷ Perlita: A mistura das duas fases, ferrita e cementita, que resulta da decomposição eutetóide da austenita.

⁸ Martensita: Uma solução sólida supersaturada de carbono em ferro, com célula unitária *tetragonal de corpo centrado* (TCC); a dureza da fase é uma função direta do teor de carbono.

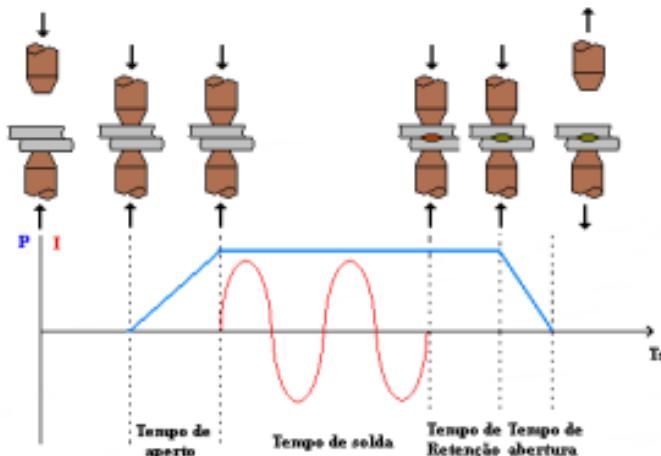
⁹ Encruamento: é um processo de endurecimento por deformação.

¹⁰ Recristalização: A nucleação de grãos novos e sem deformações, em uma matriz cristalina deformada.

2.1.5 Efeito dos parâmetros no ciclo de soldagem

Com estas informações, é necessário definir o ciclo de soldagem, baseado na espessura da chapa, a pressão entre os eletrodos, o tempo de soldagem, resistência mínima de cisalhamento e limite de resistência à tração. A influência do tempo de soldagem define efetivamente no rendimento da operação.

Figura 9 - Ciclo de soldagem



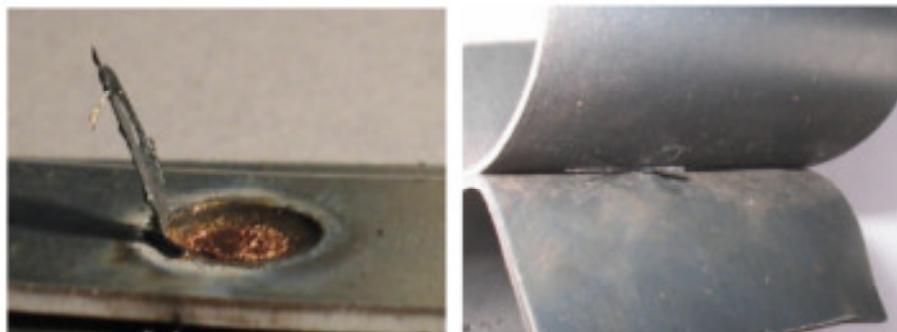
FONTE: Aures (2006)

Durante este processo, é necessário um tempo mínimo adequado da operação para se atingir a temperatura de fusão e formar a lentilha. Contudo, para se chegar no objetivo final existem sub-operações e cada uma delas tem influência no processo:

2.1.6 Tempo de compressão

É o inicio da aplicação da pressão na chapa metálica até o inicio da aplicação da corrente. Segundo (Aures, 2006) “O tempo de compressão se divide em duas etapas: tempo de acostamento e tempo de prépressão. O tempo de acostamento é o tempo que os eletrodos demoram desde a sua posição inicial, afastado das chapas, até tocar nelas - este tempo deve ser suficientemente longo para evitar fortes batidas no momento dos eletrodos encostarem na chapa.” A pressão do eletrodo afeta o contato entre pontas de eletrodo e a peça de trabalho. Muito pouca pressão não cria o contato necessário entre peças e os eletrodos. Neste caso, podem ocorrer faíscas, estouros, expulsão e o desgaste rápido dos eletrodos.

Figura 10 - Expulsão do material



a: Expulsão na superfície.

b: Expulsão interfacial.

FONTE: Branco (2004)

2.1.7 Tempo de soldagem

Segundo (Aures, 2006) “É o tempo de aplicação da corrente máxima que fornece o calor necessário para conseguir a junção da peça de trabalho”.

A quantidade de calor gerado na soldagem depende, principalmente, da corrente de soldagem. Um pequeno aumento na corrente de soldagem aumenta rapidamente o diâmetro do ponto de solda e a penetração e, consequentemente, a resistência do ponto de solda. Na maioria das máquinas de soldagem por resistência, a corrente de soldagem é ajustada como uma porcentagem da potência nominal da máquina, embora em alguns equipamentos o ajuste é feito alterando-se a relação no transformador de soldagem. O tamanho do ponto de solda aumenta mais lentamente quando se ajusta o tempo de soldagem (tempo de corrente) do que quando ocorre o ajuste da corrente de soldagem propriamente dito. O tempo de solda é ajustado em ciclos e a duração de um ciclo é de 0,0167s segundos para a frequência de energia de 60 Hz. Os tempos de soldagem podem ser seguidos com os seguintes ciclos:

- Até 1,0 mm de espessura da chapa: cerca de 10 até 12 ciclos;
- Até 1,5 mm de espessura da chapa: cerca de 12 até 15 ciclos;
- Até 2,0 mm de espessura da chapa: cerca de 14 até 18 ciclos;
- Chapa grossa ou enquanto tem diferentes tolerâncias de aceitação de chapa, tempo de subida de até 12 ciclos. Chapa fina 0,5 até 0,6 cerca de 15 ciclos.

2.1.8 Tempo de subida “upslope”

Segundo (Aures, 2006) “upslope” “é o tempo de aumento gradual da corrente desde o inicio do processo até um valor máximo onde a aplicação da corrente máxima se inicia. É geralmente utilizado para evitar sobreaquecimento e expulsão do metal no início do tempo de soldagem, quando a resistência da interface do metal-base ainda é alta.”

2.1.9 Tempo de corrente máxima

Segundo (Aures, 2006) “é o intervalo de tempo, relativamente curto, de aplicação da corrente máxima de soldagem. Da equação 1 pode-se ver que quando se usa intervalos de tempo de soldagem (corrente máxima) muito pequenos o valor da corrente de soldagem aumenta consideravelmente para se conseguir a energia ou calor necessário para fundir o metal base.” Este tempo é controlado pelos sistemas das máquinas de diversas formas.

A quantidade de entrada de energia na soldagem depende da corrente e do tempo de soldagem utilizado no ponto de solda. Tempos de ciclo curtos geralmente é preferido na soldagem por resistência, o que significa maior corrente de soldagem em um curto espaço de tempo. Neste caso, menos calor é conduzido para as zonas adjacentes do ponto e, consequentemente, a expansão térmica se mantém a um nível mais baixo, e o ponto se solidifica mais rapidamente. Quando se utiliza uma corrente de soldagem demasiadamente baixa, a peça e os eletrodos conduzem calor para longe da superfície de ligação e não para a poça de fusão. O aumento do tempo de soldagem aumenta o desgaste dos eletrodos e a indentação na peça. Além disso, o calor vai ter mais tempo para conduzir em uma área mais ampla em torno do ponto de solda.

2.1.10 Tempo de descida “downslope”

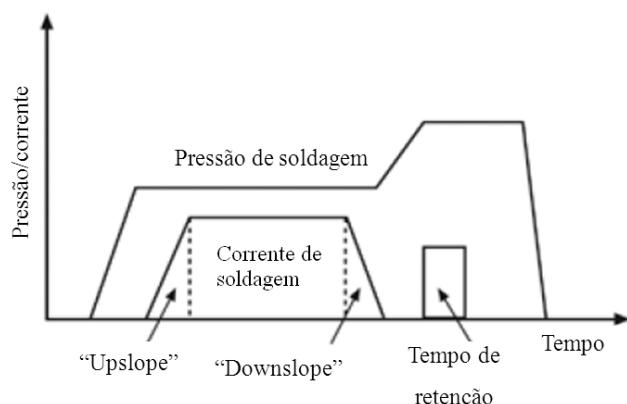
Segundo (Aures, 2006), “downslope” “é a diminuição gradual da corrente no final do tempo de soldagem. Ele é utilizado para controlar a solidificação da lente de solda e para evitar a rachaduras em metais que são endurecidos por têmpora ou sujeitos a fissuração a quente”.

2.1.11 Efeito do tempo de retenção

Segundo (Aures, 2006), “é o tempo durante o qual os eletrodos continuam na sua posição mantendo a força na peça de trabalho após o último impulso de corrente ter finalizado; durante este tempo a lentalha de solda se solidifica e é esfriada até a sua adequada resistência mecânica.”.

Isso resulta em um tempo de esfriamento e que pode ser útil quando o material a ser soldado tem uma tendência de ser frágil. Mais tempo de esfriamento ponto prejudicar o tempo de operação, porém é necessário garantir a resistência do ponto de solda e a formação da lentalha com o diâmetro mínimo especificado.

Figura 11 - Estágios de trabalho da soldagem por resistência



FONTE: Ruuki Co. (2009)

2.1.12 Outros fatores que influenciam no processo de soldagem a ponto

Outros fatores têm influência no processo de soldagem, mesmo garantindo a estabilidade das variáveis relevantes do processo. Estas influências tem um papel também importante na execução do ponto de solda. São eles:

- 1- A condição da superfície do material (sujidades, óleo, graxa, etc.), que afetam no aumento da resistência de contato;
- 2- O formato da face do eletrodo aumenta após seu desgaste aumenta a resistência para a passagem de corrente e diminui a pressão do eletrodo. Resquícios do material soldado no eletrodo também aumentam a resistência de passagem de corrente;
- 3- A composição do material e de sua proteção de superfície, pois a resistividade do material afeta na passagem da corrente e também existem problemas quando a superfície tem alguma proteção superficial, como por exemplo, chapas zincadas.

2.2 SOLDAGEM A PLASMA

2.2.1 Princípios de funcionamento

Segundo (Reis & Scotti, 2007), “o termo plasma¹¹ designa um gás suficientemente aquecido a ponto de se tornar ionizado¹², porém em equilíbrio.” “Neste estado, o gás deixa de ser isolante e passa a conduzir corrente elétrica”. Quanto mais ionizado o gás, menor resistividade e maior energia consumida, que pode gerar temperaturas em torno de 730°C até 2700°C. Portanto o processo de soldagem plasma utiliza esta baixa resistividade para transferir altos valores de corrente elétrica, e consequentemente, fornecer altos valores de calor e energia, principalmente considerando a área restrita de passagem do arco-plasma.

O processo de soldagem Plasma (PAW¹³) consiste inicialmente em provocar uma coluna de gás, com o auxílio de um arco elétrico, e aumentar sua temperatura, o suficiente para que os impactos entre as moléculas de gás provoquem entre si certo grau de dissociação e ionização. O gás ionizado é forçado a passar através de um orifício constrito e esta mudança de fluxo repentina e provoca uma grande diferença térmica entre o centro da coluna de gás com a parte mais distante, que está em contato com o bocal constrictor de cobre. Isto faz com que a densidade da coluna de gás central diminua, facilitando que os elétrons adquiram energia suficiente para ionizar os outros elétrons. Este efeito aumenta sensivelmente o grau de ionização da coluna do arco e sua temperatura, possibilitando o aumento de energia transferida para a peça a ser soldada, sendo que o aumento da velocidade do plasma é consequência direta da constrição do orifício constrictor.

Segundo AWS¹⁴, “o processo de soldagem Plasma é um processo de soldagem a arco que promove a coalescência de metais pelo aquecimento gerado a partir de um arco constricto, que pode ser aberto entre um eletrodo não consumível e a poça de fusão (arco transferido), ou entre o eletrodo e o bocal de constrição (arco não-transferido). A proteção é geralmente obtida do gás aquecido e ionizado emitido da tocha, sendo esta proteção pode ser suplementada por uma fonte auxiliar de gás. O processo é usado sem aplicação de pressão e podendo utilizar metal de adição.”.

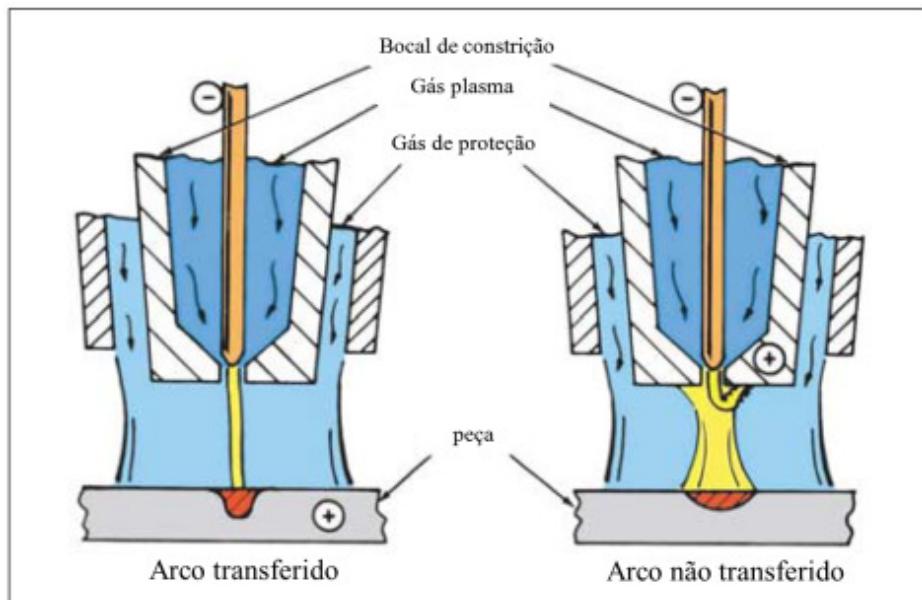
¹¹ - O plasma é um material em estado gasoso, com uma fração substancial de partículas ionizadas.

¹² - Quando elétrons são retirados dos átomos, diz-se que o átomo ficou ionizado, sendo então chamado de íon.

¹³ - PAW – *Plasma Arc Welding* – soldagem arco-plasma

¹⁴ - American Welding Society – Associação Americana de Soldagem

Figura 12 - Arco Transferido e não transferido

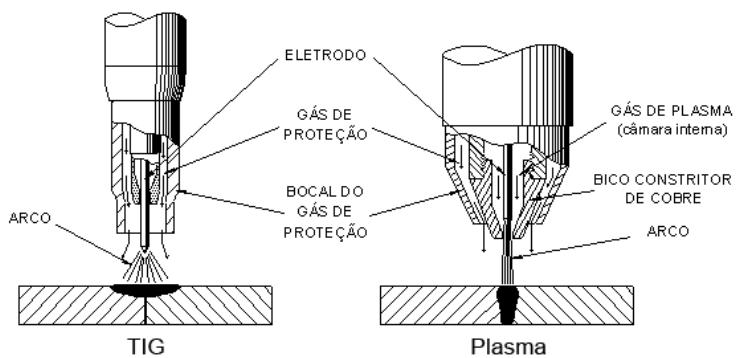


FONTE: AWS (2005)

2.2.2 A formação do arco

A diferença básica do processo Plasma do processo TIG¹⁵ (GTAW¹⁶) é a constrição do arco, que oferece melhor controle sobre a intensidade de energia do arco. O grau de colimação, a força do arco, a densidade de energia sobre a peça são funções das seguintes variáveis: intensidade da corrente do plasma, forma e diâmetro do orifício constritor, tipo e vazão do gás.

Figura 13 - Diferenciação básica entre os processos TIG e Plasma



FONTE: IMC Soldagem (2011)

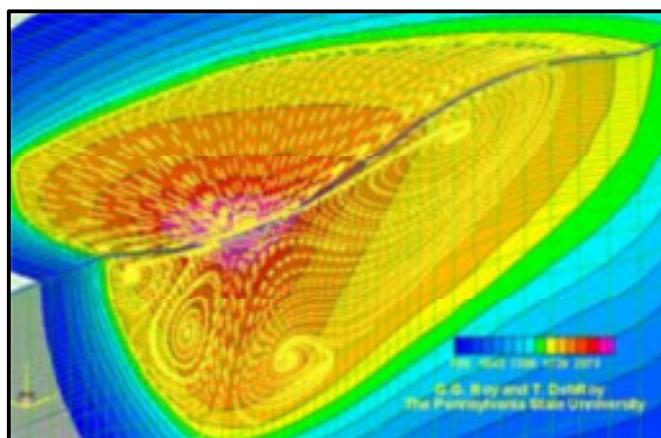
¹⁵ - TIG – *Tungsten Inert Gas*

¹⁶ - GTAW – *Gas Tungsten Arc Welding*

O efeito térmico, e consequentemente quanto mais intenso o calor que atinge a peça, maior será o volume fundido. Esta grande geração de calor é devido à alta concentração localizada de corrente, e consequentemente, uma elevada queda na tensão¹⁷.

A junção do arco elétrico com a peça deve-se ao calor transferido por condução e a entalpia de ionização¹⁸ dos gases. Segundo (Scotti & Ponomarev, 2008), “uma característica comum dos gases é a de não serem condutores de eletricidade em condições normais. Entretanto, sob condições favoráveis (altas temperaturas, baixíssima pressão e ou submetidos a um campo elétrico de altíssima intensidade), os gases podem se ionizar, seus átomos podem liberar ou receber elétrons, tornando-se cátions (íons de carga positiva) ou, em menor probabilidade, ânions (íons de carga negativa), respectivamente. Devido a estas mudanças, os gases passam para o quarto estado da matéria, chamado de plasma. Os plasmas, por sua vez, são condutores de eletricidade.” Quanto maior o potencial de ionização do gás, maior a entalpia. Portanto, quanto mais intenso o calor que atinge a peça e maior entalpia de ionização do gás, maior será o volume fundido.

Figura 14 - Distribuição do calor



FONTE: Scotti (2010)

A força do arco também é um mecanismo que auxilia na soldagem Plasma. O impacto do jato na poça de fusão expulsa o metal líquido para as laterais, que fornece maior eficiência

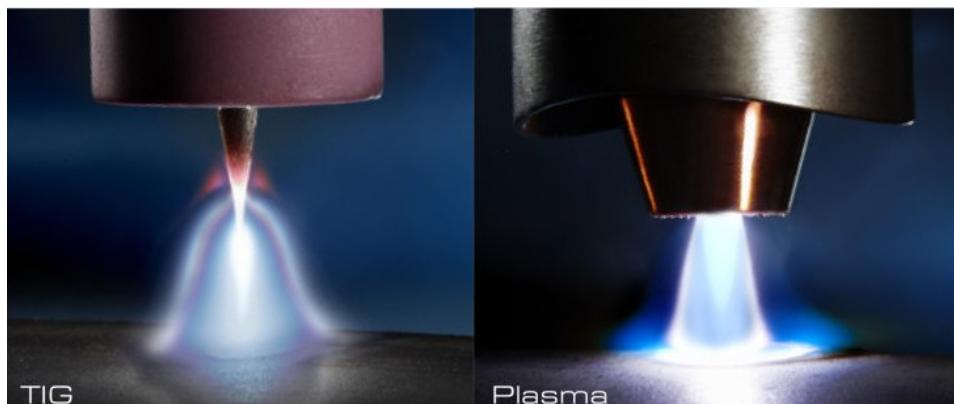
¹⁷ - A rigor, o termo tensão em eletricidade é uma forma simplificada de se dizer diferença de potencial (ddp), já que tensão é sempre medida em relação a um referencial. Por isto, quando se refere à tensão em uma resistência se fala da queda da mesma, ou seja, da variação de tensão a um referencial (ou da tensão consumida) para fazer certa quantidade de corrente passar por este resistor. (Scotti & Ponomarev, Soldagem MIG/MAG, 2008)

térmica. As forças mecânicas dos campos magnéticos também geram pressão sobre a poça de fusão.

2.2.3 O efeito da constrição

Dado a semelhança do processo TIG e o processo Plasma, o processo de colimação do arco é fundamental para a concentração de temperatura e energia. A pressão de um arco constrito é 10 vezes maior que um arco não constrito.

Figura 15 - Processo TIG e Plasma

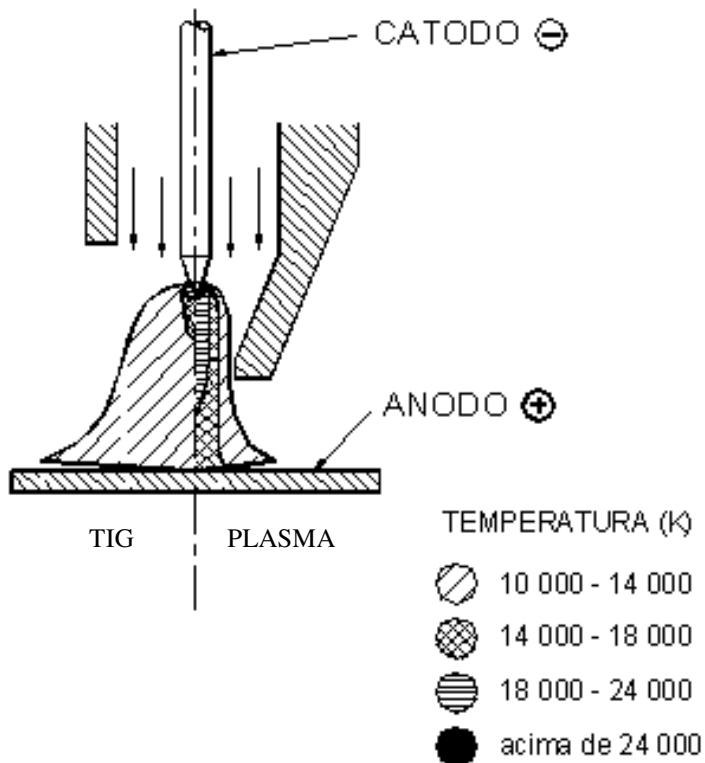


FONTE: EWI Group (2013)

As temperaturas alcançadas pelo Plasma se comparado ao TIG garantem a qualidade do processo e a penetração concentrada necessária.

¹⁸ - A entalpia de ionização pode ser definida como a energia interna (normalmente expressa em kJ/mole) adquirida por um átomo durante seu processo de aquecimento até a ionização. Durante a desionização e resfriamento, esta energia é devolvida ao sistema. (Reis & Scotti, 2007)

Figura 16 - Diferenças de temperatura entre os processos TIG e Plasma



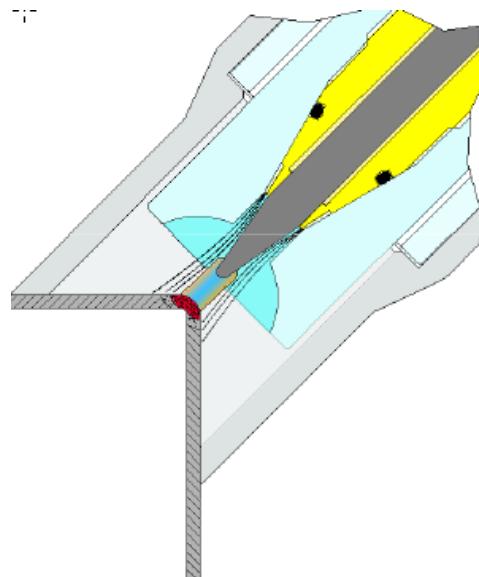
FONTE: IMC Soldagem (2011)

2.2.4 Soldagem a ponto Plasma

A soldagem a ponto por plasma utiliza o arco-plasma por um curto período de tempo, permitindo a soldagem de chapas com pouca espessura, normalmente sobreposta. Esta variação do processo de soldagem plasma atende as solicitações de soldagem sem acesso dos dois lados (“one-side”), solicitado pela soldagem a ponto por resistência. A vantagem do processo é a formação de deformações mínimas e pequenas zonas afetadas pelo calor (ZAC).

Uma particularidade do processo é a geometria nos bocais de proteção. A tocha tem um bocal especial que garante a distância constante do bocal de constrição e a peça.

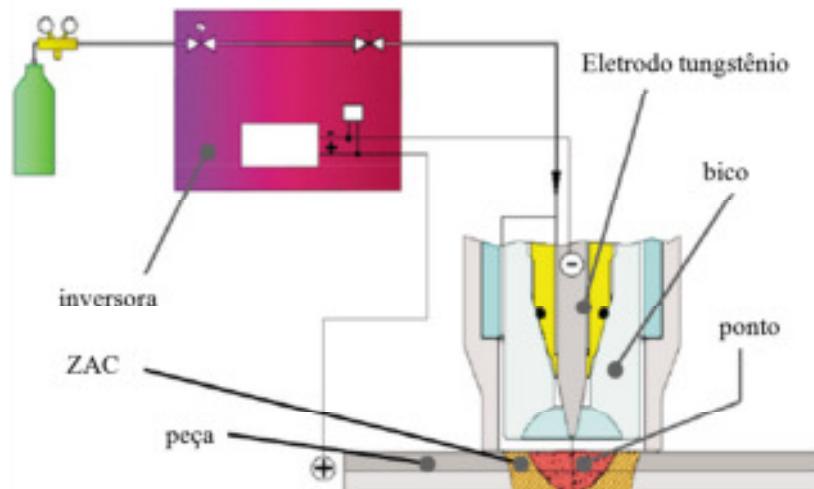
Figura 17 - Solda a ponto Plasma



FONTE: SBI GmbH (2010)

Outra diferença é o equipamento, que é bastante similar, porém tem controle do tempo de soldagem e o tempo de gás após a ponteação.

Figura 18 - Esquema equipamento soldagem plasma

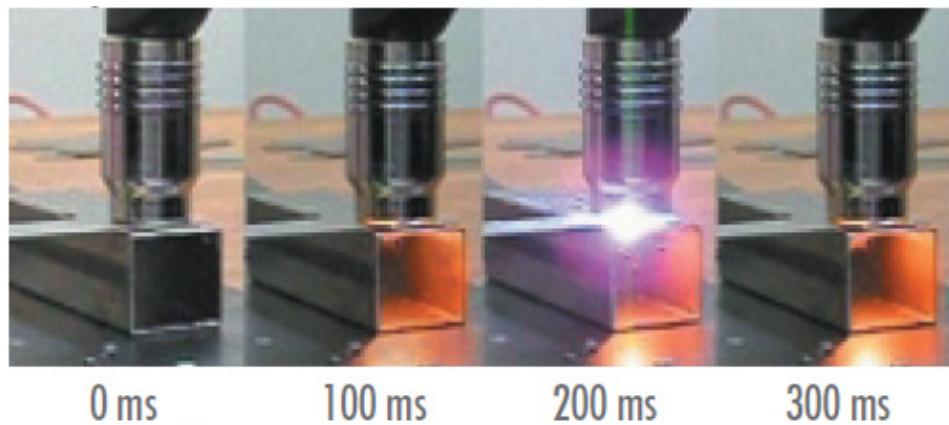


FONTE: SBI GmbH (2010)

O tempo de soldagem plasma a ponto (0,2 a 2s) é geralmente um pouco maior que o tempo da soldagem a ponto (0,1 a 0,3s), pois consiste em abertura do arco piloto, abertura do arco

principal, formação do ponto e resfriamento, diferente da sequencia do ponto de solda por resistência.

Figura 19 - Sequência de soldagem a ponto por plasma



FONTE: SBI GmbH (2010)

O tamanho reduzido das tochas facilita a soldagem manual, porém o mais utilizado é para a soldagem automatizada.

Figura 20 - Soldagem a plasma automatizada



FONTE: SBI GmbH (2010)

O gás utilizado é o argônio puro ou misturas com hidrogênio para proteção.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS E PARÂMETROS

Os processos para análise da viabilidade técnica da aplicação da soldagem a ponto plasma foram:

- A escolha dos materiais;
- As espessuras das chapas.

As chapas metálicas foram selecionadas e têm as seguintes características:

A. A chapa de 0,7mm DIN EN 10130 +A1-DC04+A-M que têm as seguintes características e a partir de agora será chamada de CHAPA A:

Tabela 1 - Composição química CHAPA A

Grade do Aço		C máx.	Si máx.	Mn máx.	P máx.	S máx.	Al _{total}	Nb máx.	Ti máx.
Nome aço	Número aço								
DC04	1.0338	0,12	----	0,40	0,03	0,03	----	----	----

Tabela 2 - Propriedades mecânicas CHAPA A

Designação		Limite de elasticida de RP _{0,2} MPa	Índice de encruament o térmico BH ₂ MPa mín.	Resistência à tração R _m Mpa	Alongamento A80 % mín.	Taxa de deformação plástica r ₉₀ mín.	Tensão de endurecimento n90 mín.
Grade do Aço							
Nome aço	Número aço						
HX220YD	1.0923	até 280	-	270 a 350	38	0,18	----

B. A chapa de 0,9mm DIN EN 10346 – HX220YD +Z100MA que têm as seguintes características e a partir de agora será chamada de CHAPA B:

Tabela 3 - Composição química CHAPA B

Grade do Aço		C máx.	Si máx.	Mn máx.	P máx.	S máx.	Al _{total}	Nb máx.	Ti máx.
Nome aço	Número aço								
HX220YD	1.0923	0,01	0,20	0,90	0,08	0,025	≤0,1	0,09	0,12

Tabela 4 - Proteção superficial CHAPA B

Designação do revestimento	Massa do revestimento total mínimo - ambas superfícies g/m ²		Valores de orientação teórica para a espessura do revestimento por superfície no teste de ponto único μm		Densidade g/cm ³
	Teste de ponto triplo	Teste de ponto único	Valor típico	Range	
Z100	100	85	7	5 a 12	7,1

Tabela 5 - Propriedades mecânicas CHAPA B

Designação		Limite de elasticida de RP _{0,2} MPa	Índice de encruamento térmico BH ₂ MPa mín.	Resistência à tração R _m Mpa	Alongamento A80 % mín.	Taxa de deformação plástica r ₉₀ mín.	Tensão de endurecimento n90 mín.
Grade do Aço							
Nome aço	Número aço						
HX220YD	1.0923	220 a 280	-	300 a 360	37	1,9	0,20

C. A chapa de 1,8mm DIN EN 10292-HX300PD+Z100MB que têm as seguintes características e a partir de agora será chamada de CHAPA C:

Tabela 6 - Composição do material CHAPA C

Grade do Aço		C	Si	Mn	P	S	Al _{total}	Nb	Ti
Nome aço	Número aço	máx.	máx.	máx.	máx.	máx.		máx.	máx.
HX300PD	1.0443	0,11	0,50	0,70	0,12	0,025	0,02	0,09	0,22

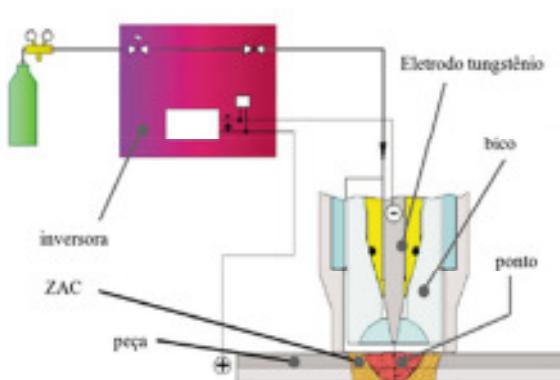
Tabela 7 - Proteção superficial CHAPA C

Designação do revestimento	Massa do revestimento total mínimo - ambas superfícies g/m ²		Valores de orientação teórica para a espessura do revestimento por superfície no teste de ponto único μm		Densidade g/cm ³
	Teste de ponto triplo	Teste de ponto único	Valor típico	Range	
Z100	100	85	7	5 a 12	7,1

Tabela 8 - Propriedades mecânicas CHAPA C

Designação		Limite de elasticida de RP _{0,2} MPa	Índice de encruamento térmico BH ₂ MPa mín.	Resistência à tração R _m Mpa	Alongamento A80 % mín.	Taxa de deformação plástica r ₉₀ mín.	Tensão de endurecimento n90 mín.
Grade do Aço							
Nome aço	Número aço						
HX300PD	1.0433	300 a 360	-	400 a 480	26	-	-

Após a definição do material, foi feita análise crítica do procedimento de soldagem da empresa SBI Produktion techn. Anlagen GmbH., conforme fig. 21 e foram iniciados os ajustes dos parâmetros de soldagem.

Figura 21 - Parâmetros para soldagem

FONTE: SBI GmbH (2010)

Ponto plasma conexões:	SBI
fonte de corrente:	SBI
tocha:	
gás:	Ar/H ₂
vazão gás plasma:	1,5 l/min
corrente soldagem:	150 A
tempo de corrente	0,6 sec.

Foi utilizada fonte de soldagem multiprocesso IMC inversal 300.

Tabela 9 - Dados técnicos do equipamento

Tensão	220, 380 ou 440V trifásica
Tensão em vazio	56V
Corrente	Contínua ou alternada (constante ou pulsada)
Corrente nominal	300A

Potência máxima consumida	12 kW
Fator de potência	0,94

Também foi utilizada uma unidade de módulo plasma IMC-1 e dois medidores de vazão, para o gás de plasma MVG-1 com vazão permissível de 0,3 a 2,8 l/min. e MVG-1 para o gás de proteção com vazão permissível de 2,5 a 23,5 l/min.

3.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Os parâmetros para o procedimento experimental foram os definidos abaixo, considerando as indicações recomendadas. A técnica de soldagem utilizada foi a melt-in, que é a mais recomendada para soldagens autógenas¹⁹ e chapas de espessuras inferiores à 3mm.

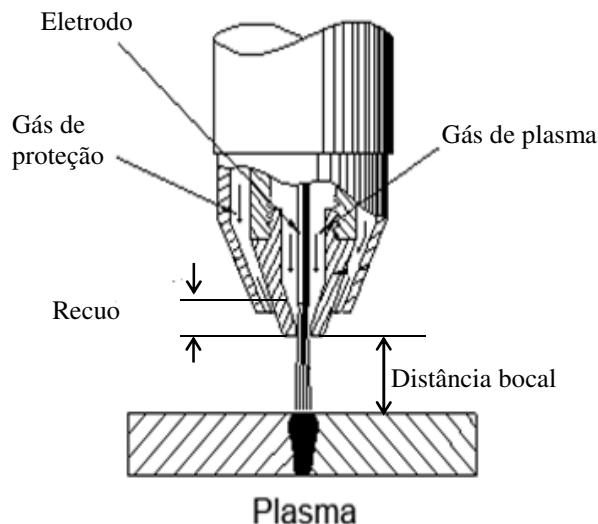


Tabela 10 - Parâmetros de soldagem

Corrente	150A
Tensão	31V
Gás de proteção	100% Ar 8 l/min.
Tempo pré-gás	

¹⁹ Autógena – é uma soldagem que não necessita de metal de adição. A energia fornecida pelo processo de soldagem é suficiente para fusão dos metais.

Tempo pós-gás	2s
Gás plasma	100% Ar
Eletrodo	2 l/min.
	Ø 4,8mm
	WT20 (Vanádio com 2% Tório)
	60°
Recuo eletrodo	5 mm
Distância bocal/peça	3 mm
Tempo de corrente	1s

Como primeiro teste, foram utilizadas as referências fornecidas pela SBI GmbH. As peças foram sobrepostas e fixadas com grampos para união da mesma e para fixação na bancada.

Figura 22 - Montagem da peça no dispositivo para os testes



FONTE: o autor

3.2.1 Experimentos CHAPA A

A primeira chapa de teste utilizada foi a chapa de 0,7 mm com o material DIN EN 10130+A1-DC04+A-M que a partir de agora será chamada de CHAPA A.

No primeiro ponto realizado a peça furou, então foram programados e ajustados diversos tempos de corrente com valores baseados nas indicações preliminares. Os resultados são mostrados na fig. 23.

Figura 23 - Resultados da amostra 1



FONTE: o autor

Foi verificado que o ponto de solda com 0,6s e 0,5s de tempo de corrente ocorreu o furo da chapa superior, enquanto nos tempos de 0,2s e 0,1s de tempo de corrente, não ocorreu a fusão com a chapa inferior.

Diante destes resultados, foi alterada a quantidade de gás de plasma para 1,2 l/min, e os resultados são apresentados na figura abaixo.

Figura 24 - Testes da amostra 2



FONTE: o autor

Como se pode observar na figura 24, com esta quantidade de gás de plasma de 1,2 l/min não se obteve a fusão do ponto com tempo de corrente de 0,5s, porém com o tempo de corrente de 0,6 segundos, a chapa superior foi furada. Mas pode-se observar que houve um pequeno preenchimento com o material fundido.

Com isto, foi alterado novamente do volume de gás de plasma, para 0,8 l/min, utilizando novamente os tempos pré-ajustados, porém repassando todos os testes de tempos de corrente de soldagem conforme figura abaixo.

Figura 25 - Testes amostra 3



FONTE: o autor

Com os resultados da amostra 3, foi verificado que a quantidade de gás de plasma de 0,8 l/min. estava muito próxima do ideal e que as peças necessitavam de um assentamento perfeito (folga zero) para que a parte superior da peça conseguisse fazer a união com a parte inferior.

Na amostra 4 foram feitas amostras aumentando o tempo de corrente para 0,6s e 0,7s.

Figura 26 - Testes amostra 4



FONTE: o autor

Pode-se observar na fig. 26 que o ponto se formou corretamente no tempo de 0,7s, e recapitulando, com volume de gás de 0,8 l/min..

Foram feitos mais pontos com estes parâmetros e realizado o teste de cisalhamento com cisel, comprovando o rasgamento da CHAPA A e mantendo o estado de união do ponto de solda.

Figura 27 - Testes de arrancamento



FONTE: o autor

Tabela 11 - Parâmetros alterados para CHAPA A

Gás de plasma	0,8 l/min.
Tempo de corrente	0,7s

Portanto, os resultados dos testes iniciais foram positivos, permitindo o prosseguimento dos demais testes.

3.2.2 Experimentos CHAPA B

A segunda amostra de teste utilizado foi a chapa de 0,9mm DIN EN 10346 – HX220YD +Z100MA - que será denominada CHAPA B.

O objeto de estudo nesta chapa é a aplicação de camada de zinco, e os problemas resultantes deste tipo de material, conforme informações abaixo:

Figura 28 - Contras do processo de soldagem plasma a ponto (modificado)

Contras: • sensibilidade de trinca a quente de ligas de alumínio por não ter nenhum metal de adição; • problemas com revestimentos de Zinco; • máxima espessura da chapa superior: 2,5 mm.

FONTE: SBI GmbH

Para este experimento, foram utilizados os seguintes parâmetros:

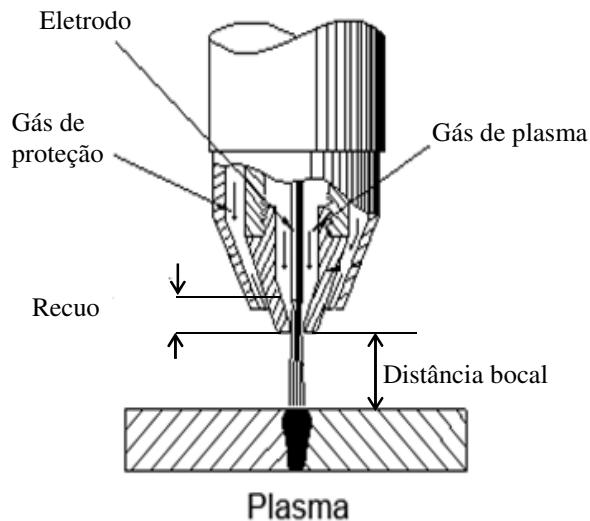


Tabela 12 - Parâmetros de soldagem com zinco

Corrente	150A
Tensão	31V
Gás de proteção	100% Ar 8 l/min.
Tempo pré-gás	0s
Tempo pós-gás	2s
Gás plasma	100% Ar 0,8 l/min.
Eletrodo	Ø4,8 mm WT20 (Vanádio com 2% Tório) 60°
Recuo eletrodo	5 mm
Distância bocal/peça	3 mm
Tempo de corrente	0,7s

Para a soldagem da CHAPA 3 foi inicialmente utilizado os parâmetros da soldagem da CHAPA 1 para inicio da parametrização. Os resultados são apresentados na fig. 29.

Figura 29 - Amostra 7 - soldagem com zinco



FONTE: o autor

Os resultados dos primeiros testes mostraram que com o tempo de 0,7s a chapa furou. Mostrou também a expulsão da camada de zinco da região.

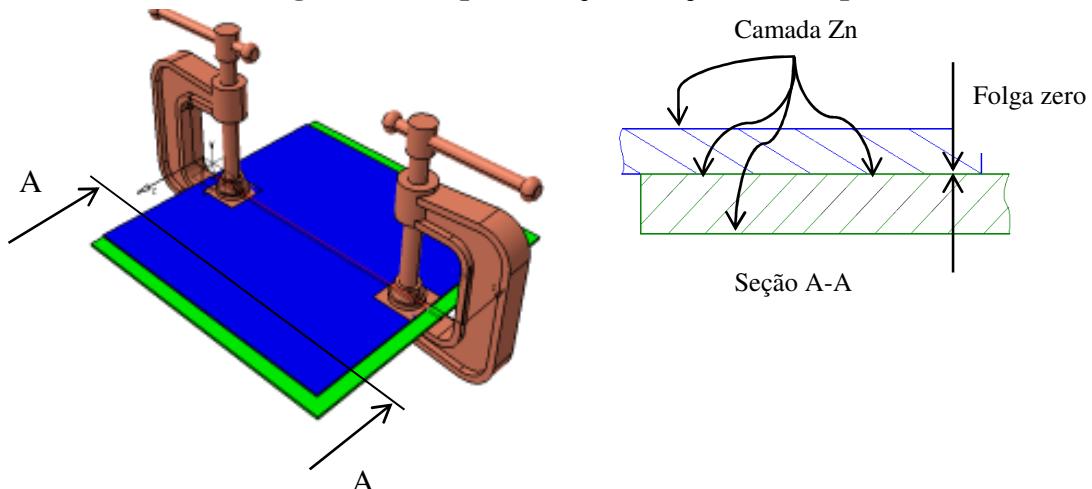
Vale lembrar que o processo de soldagem tem que superar a barreira de zinco na chapa galvanizada. O valor típico no caso da CHAPA B é de $7\mu\text{m}$ por lado, então podemos considerar $28\mu\text{m}$ de zinco para ser superado pela soldagem.

O ponto de fusão do zinco é em torno de 419°C , enquanto, quanto ao aço é de aproximadamente 850°C .

Porém, diferente da soldagem a ponto, não se forma o latão, que é a mistura do zinco do revestimento da chapa com o cobre do eletrodo. Com a análise mais detalhada dos pontos, verificou-se que todos os pontos estavam furados, com tempo de 0,6s a 0,8s. Claramente a chapa zincada é mais sensível à folga entre as chapas. Usualmente, os vapores do zinco não têm um caminho adequado para escapar e abruptamente explodem e criam uma saída pela poça de fusão.

Foram feitos novos testes com a peça fixada com prisioneiros em torno do ponto de solda a ser executado, garantindo que existia a mínima folga entre as chapas.

Figura 30 - Representação fixação das chapas



FONTE: o autor

Novamente o resultado com tempo de corrente de 0,7s foi positivo, mostrando claramente que a folga entre as chapas é um parâmetro essencial para este tipo de soldagem.

Figura 31 - Resultados com chapa zincada



FONTE: o autor

3.2.3 Experimentos CHAPA C

A terceira amostra de teste utilizada foi a chapa de 1,8mm DIN EN 10292-HX300PD +Z100MB - que será identificada como CHAPA C.

Os testes realizados serão para validação de chapas com revestimento de zinco e de espessuras mais elevadas, neste caso com a chapa superior e inferior com 1,8mm.

Foram aumentados os valores de tempo de corrente para 0,8s para inicio dos testes e avaliando progressivamente o aumento do mesmo.

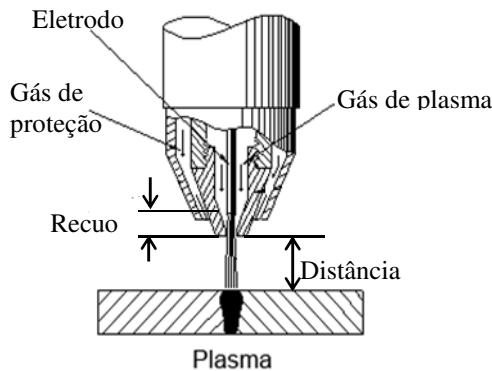


Tabela 13 - Parâmetros de soldagem com zinco e espessura 1,8mm

Corrente	150A
Tensão	31V
Gás de proteção	100% Ar 8 l/min.
Tempo pré-gás	0s
Tempo pós-gás	2s
Gás plasma	100% Ar 0,8 l/min.
Eletrodo	Ø4,8 mm WT20 (Vanádio com 2% Tório) 60°
Recuo eletrodo	5 mm
Distância bocal/peça	3 mm
Tempo de corrente	0,8s

Como mostrado na tabela abaixo, os resultados progressivos do aumento do tempo de corrente foram apresentando a evolução da qualidade do ponto de solda.

Tabela 14 - Resultados testes com CHAPA C de 1,8 mm

Tempo de corrente	Resultado
0,8s	Área de fusão muito pequena – não soldou.
0,9s	Área de fusão muito pequena – não soldou.
1,2s	A área de fusão aumentou, porém não ocorreu a fusão – não soldou.
2s	Diâmetro do ponto aumentou consideravelmente, mas não soldou
3s	Além de ter furado a chapa exterior, não teve fusão adequada na
4s	Os resultados foram positivos.
5s	A chapa superior e inferior aconteceu o furo no ponto de solda.

Figura 32 - Evolução das experiências de tempo de corrente



FONTE: o autor

O tempo de corrente é variável essencial no processo, e o aumento da espessura necessita de mais tempo de corrente, aproximando da informação de que espessuras acima de 2,5 mm podem ser problemáticas.

Como mostrado na figura abaixo, o resultado com 4s de tempo de corrente foi positivo. O assentamento da chapa superior com a inferior teve que ser novamente perfeito para impedir a falha do ponto furado na peça inferior.

Figura 33 - Resultados testes espessura 1,8mm



FONTE: o autor

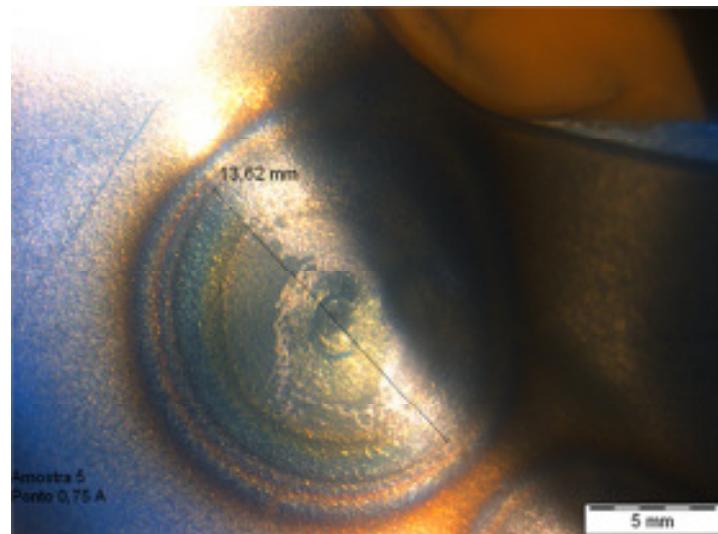
4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

4.1 PROCEDIMENTOS REALIZADOS

4.1.1 Procedimento metalográfico e macrográfico

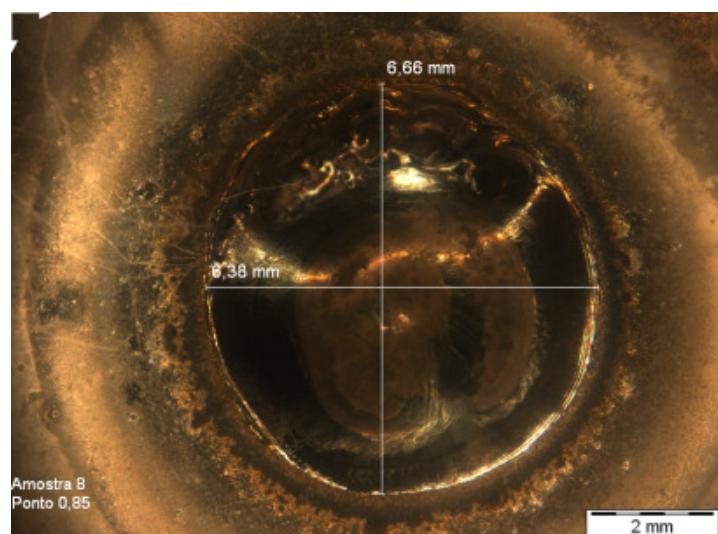
Primeiramente foi realizado o dimensional do diâmetro do ponto de solda plasma.

Figura 34 - Diâmetro ponto CHAPA A



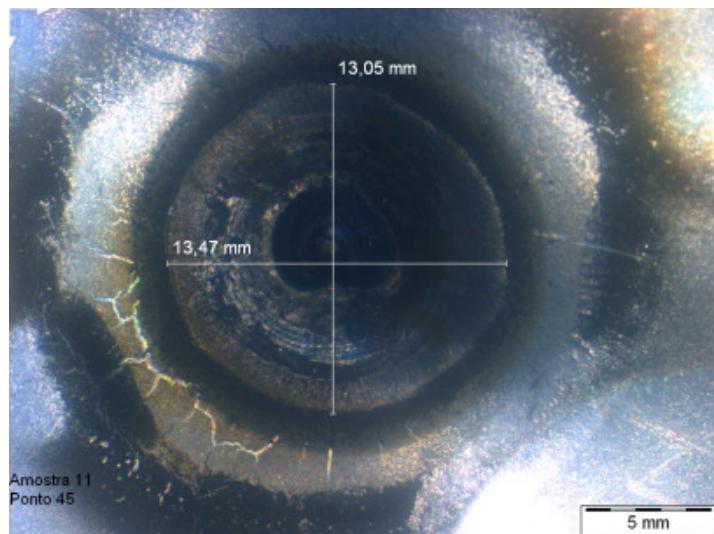
FONTE: O autor

Figura 35 - Diâmetro ponto CHAPA B



FONTE: O autor

Figura 36 - Diâmetro ponto CHAPA C



FONTE: O autor

Após corte na seção transversal, as amostras CHAPA A, CHAPA B e CHAPA C que realizaram a soldagem de pontos de solda Plasma, foram preparadas para exame metalográfico através de embutimento a quente em baquelite, seguido de lixamento com lixas de grana 80, 320, 400, 600 e 1200. O procedimento de lixamento iniciou com a lixa de menor grana e terminava com a de maior grana seguido de polimento.

O ataque químico foi realizado com nital 3%. O tempo de ataque das amostras foi de aproximadamente 5 segundos.

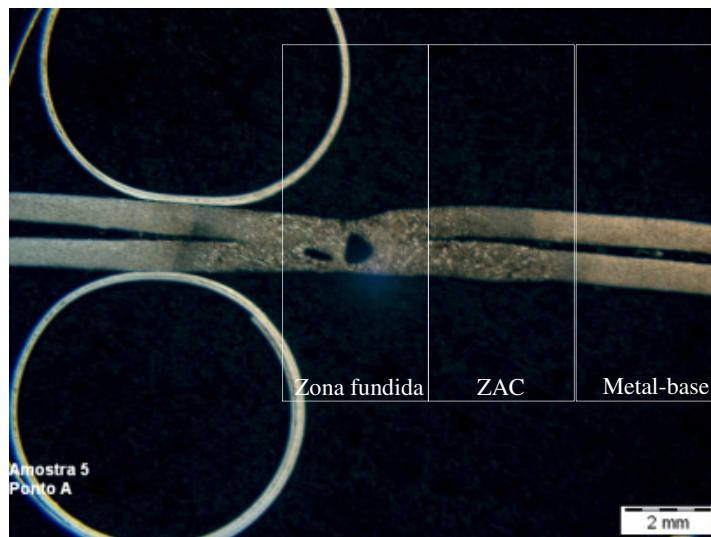
Os pontos de solda foram analisados com microscópio Olympus BX60M, de forma a caracterizar a formação de defeitos ao longo da região soldada, e com microscópio Olympus SZX10 na superfície externa das chapas.

4.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.2.1 Análise resultados CHAPA A

A figura 37 mostra o detalhamento metalográfico o ponto de solda plasma da CHAPA A. Nesta chapa está claramente definida as zona de aumento de grão com relação ao aporte de calor gerado pelo processo Plasma. Nas próximas figuras será analisada detalhadamente cada região.

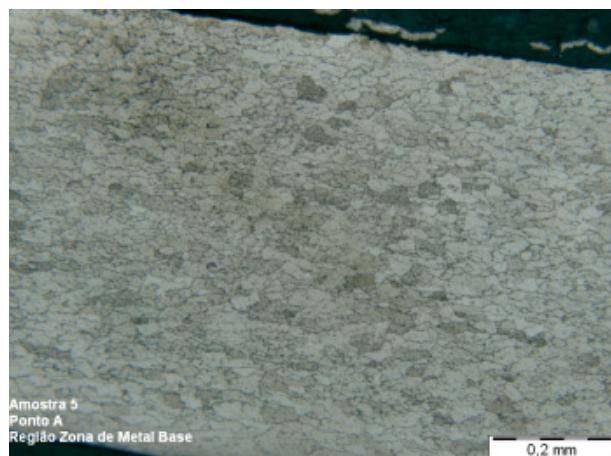
Figura 37 - Metalografia CHAPA A



FONTE: O autor

Na figura 38 podemos observar a estrutura dos grãos do metal-base. Os grãos são retilíneos, comuns em chapas laminadas e com dimensões equivalentes.

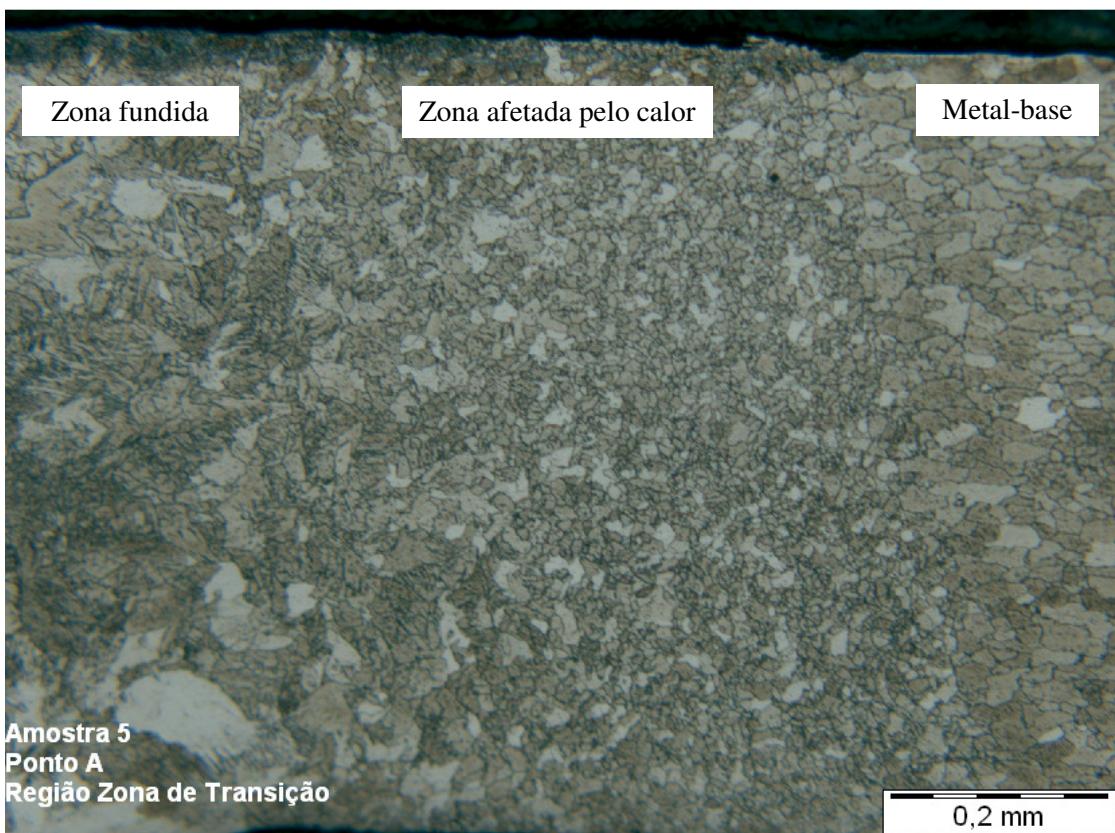
Figura 38 - Região do metal-base CHAPA A



FONTE: O autor

Na figura 39 é possível ver claramente as diferenças do tamanho de grãos, e consequentemente, as zonas de transição de calor e resfriamento do ponto de solda. O interessante é o refinamento dos grãos na zona afetada pelo calor (ZAC). Pode-se observar que a ZAC teve uma diminuição do grão e aparência celular, apresentando uma região de fina granulação em consequência da soldagem.

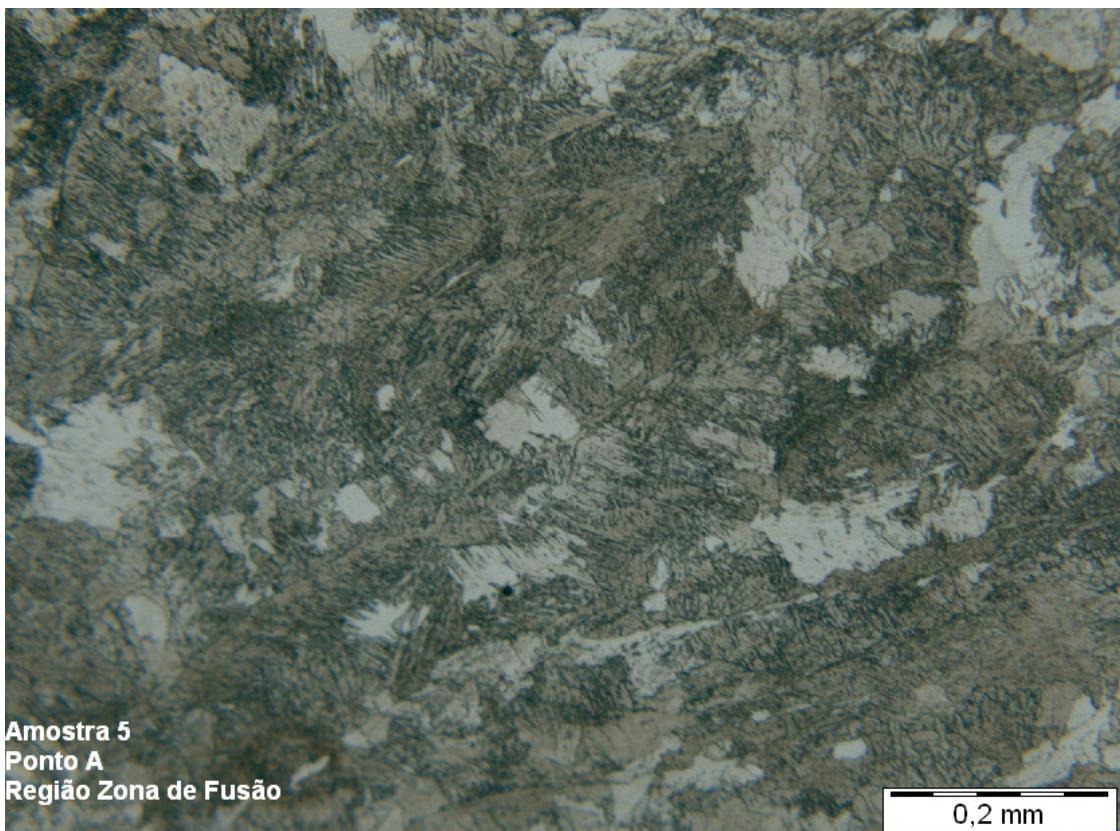
Figura 39 - Zona afetada pelo calor CHAPA A



FONTE: O autor

Na figura 40 é mostrada a zona de fusão do ponto, mostrando o aumento expressivo do tamanho do grão, com formato celular-dentrítico. No entanto, não foi verificado nenhum ponto de micro-trinca na análise macrográfica.

Figura 40 - Zona fundida CHAPA A



FONTE: O autor

Entretanto, no centro do ponto de solda, foi observado poros de dimensões enormes, como mostrado na figura 41.

Figura 41 - Poros na zona fundida CHAPA A



FONTE: O autor

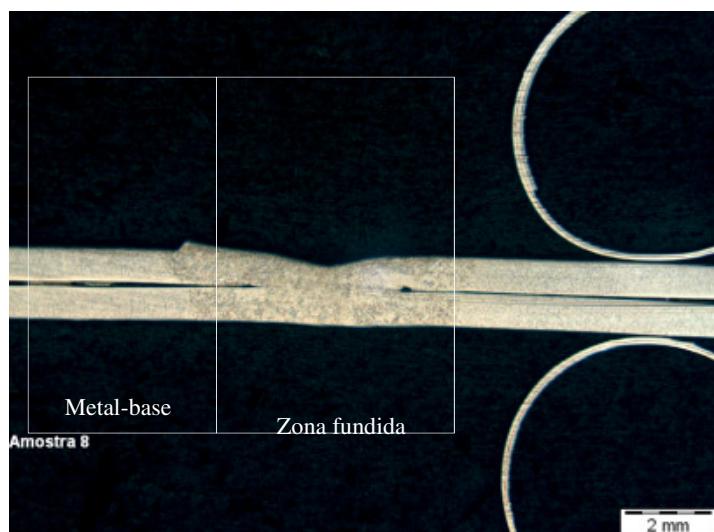
Esta falta de material pode ter sido causada pelo acumulo do gás de proteção ou do gás plasma e a dificuldade de sua saída da poça de fusão. Para porosidade de gás, na especificação 2011, da norma DIN EN ISO 5817, tendo como referência as regras como uma camada

simples, deve ser considerada a porosidade menor que 2,5% da espessura, ou seja, no máximo 0,035mm. A classificação da falha está representada conforme DIN EN ISO 6520-1. Adiante serão discutidas soluções no processo de parâmetros de soldagem para evitar este tipo de problema, porém algumas normas permitem estes poros internos sem restrições e outras restringem tanto quanto ao formato como à quantidade.

4.2.2 Análise resultados CHAPA B

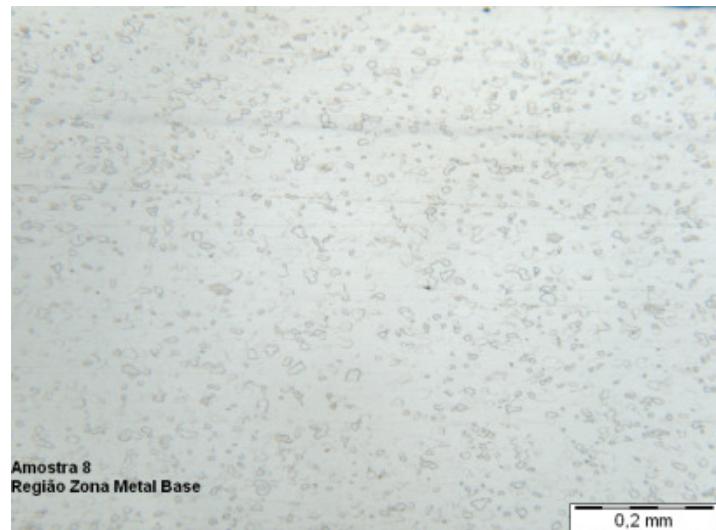
A figura 42 apresenta-se a metalografia da CHAPA B, que é um aço de baixíssimo carbono e que contém camada de zinco.

Figura 42 - Metalografia CHAPA B



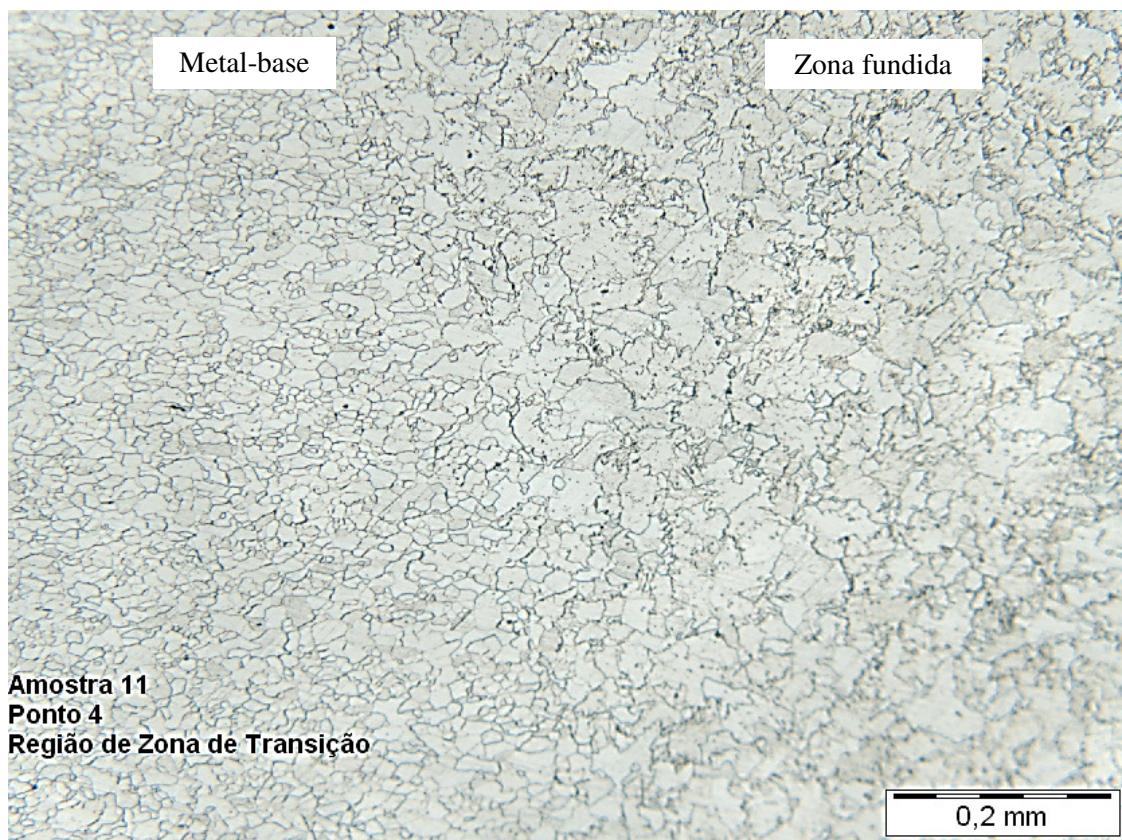
FONTE: O autor

Na figura 43 podemos observar a estrutura dos grãos do metal-base. Pode-se verificar na formação estrutural a baixíssima quantidade de carbono.

Figura 43 - Metal-base CHAPA B

FONTE: O autor

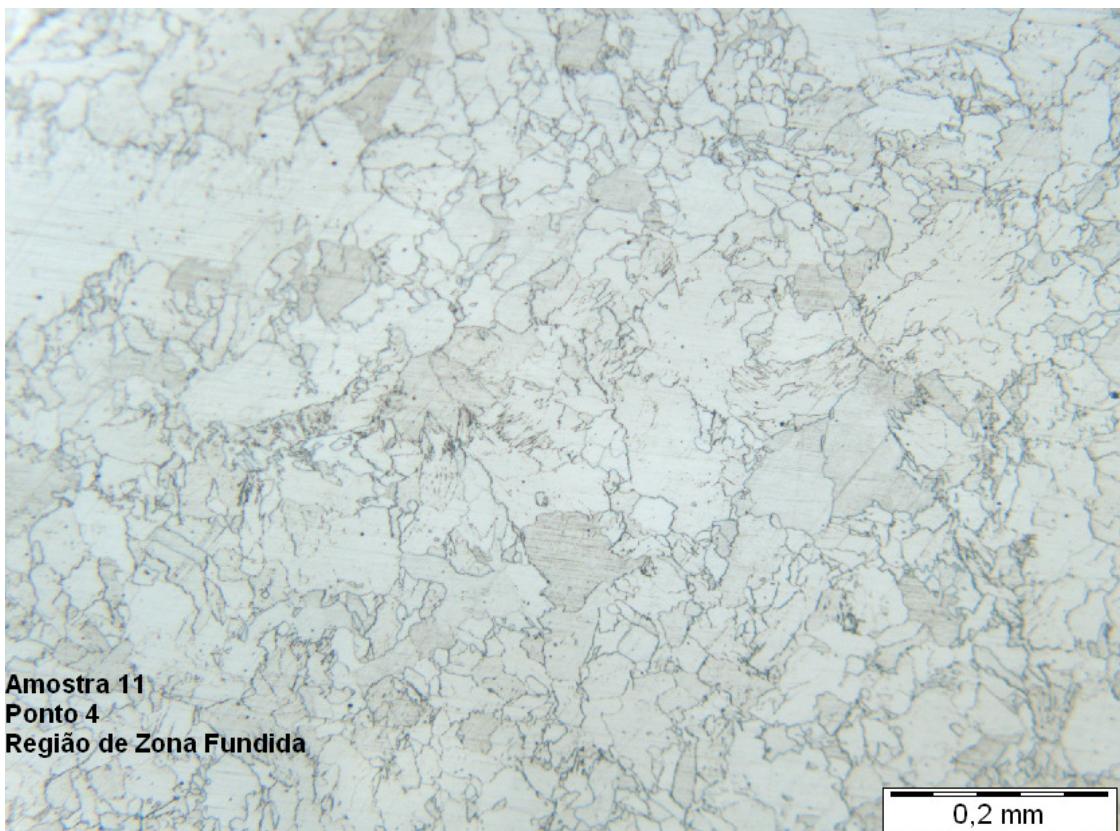
Na figura 44 é possível verificar somente 2 regiões pelo tamanho de grãos, a do metal-base e a da zona fundida. Não há uma divisão da zona afetada pelo calor e existe o aumento direto do tamanho de grãos.

Figura 44 - Zona de transição CHAPA B

FONTE: O autor

Na figura 44 é possível ver detalhamento o aumento de grãos da zona fundida. Neste caso, pode se observar a formação de algumas regiões dentríticas, mas a formação principalmente planar.

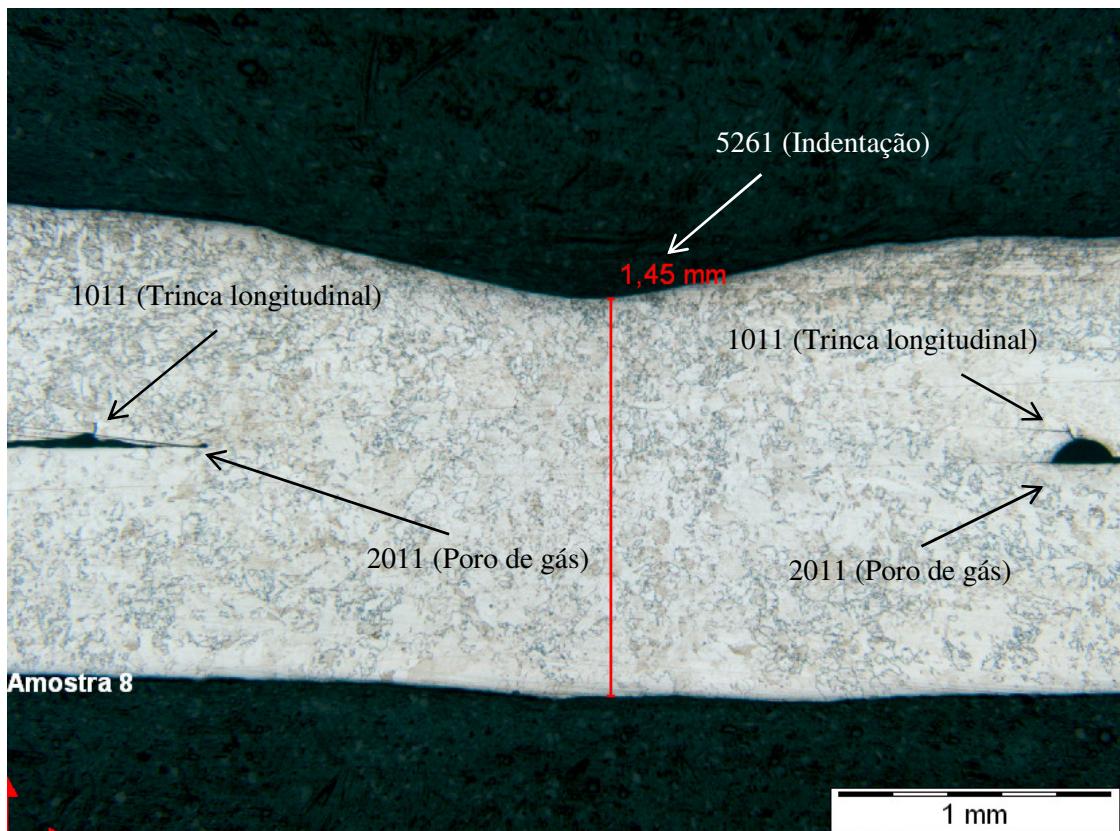
Figura 45 - Zona fundida CHAPA B



FONTE: O autor

No caso da CHAPA B, não houve o aparecimento de poros na região da zona fundida, porém apresentou o mesmo problema, em menor escala, na região de conexão entre as chapas. A saída dos gases de proteção e gás plasma podem novamente ter influenciado negativamente na incidência deste problema.

Figura 46 - Poros na CHAPA B

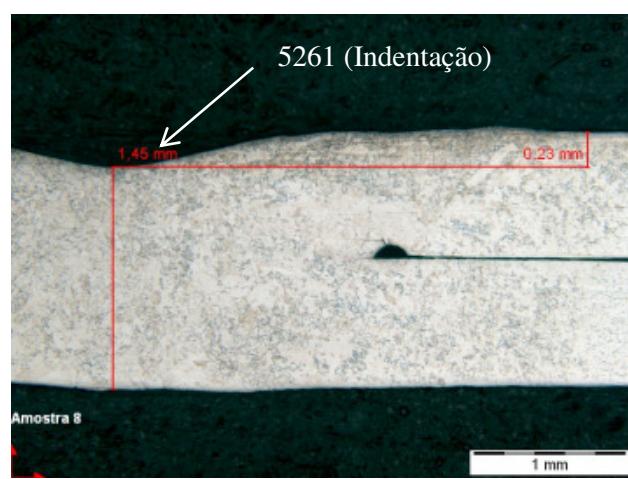


FONTE: O autor

Foram verificados na CHAPA B poros em decorrência do gás, trincas próximas destes poros e indentação elevada. Os defeitos foram classificados conforme DIN EN ISO 6520-1 e a indentação foi classificada conforme DIN EN ISO 6520-2.

Na figura 47 pode-se observar a profundidade da indentação, que foi na ordem de 14%.

Figura 47 - Indentação CHAPA B



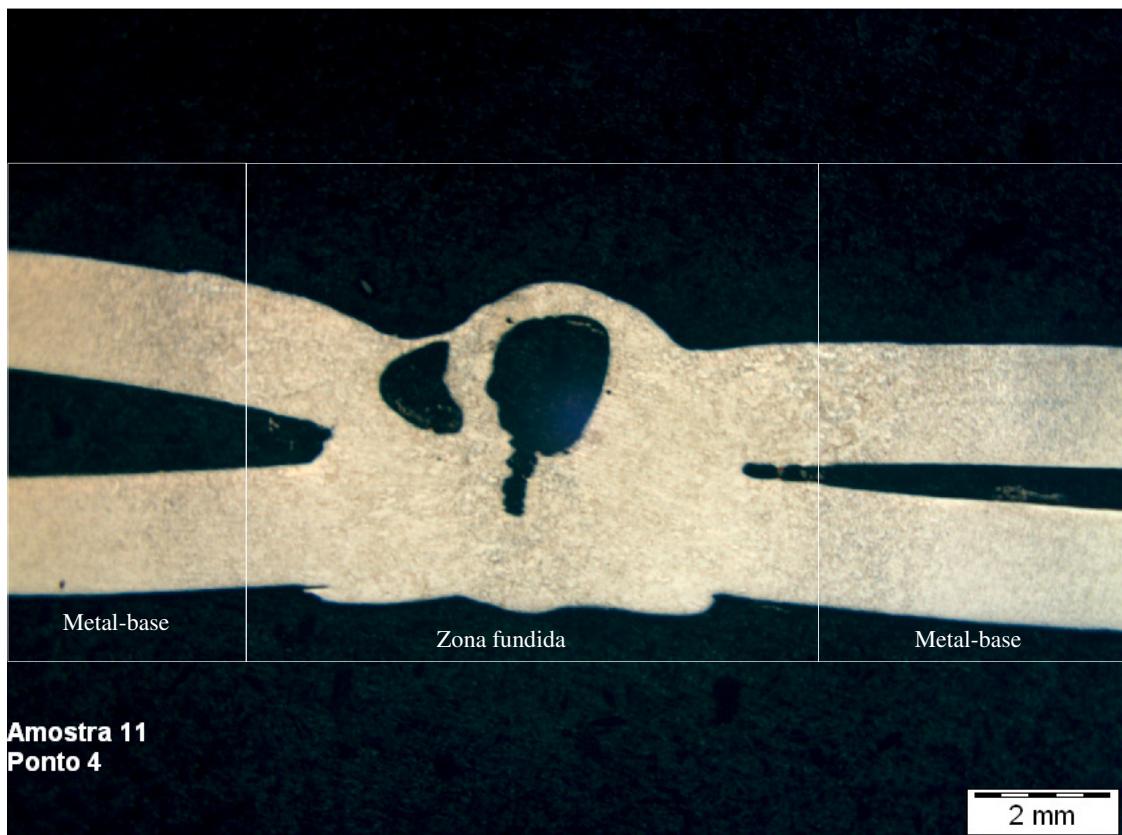
FONTE: O autor

Conforme norma DIN EN ISO 5817, em uniões $\geq 0,5\text{mm}$ de espessura para qualquer limite de qualidade requerido (D, C e B), não é permitido nenhum “tipo de trincas, menos micro-trincas e trincas de crateras”, na especificação de defeito “100”. Para porosidade de gás, na especificação 2011, tendo como referência as regras como uma camada simples, deve ser considerada a porosidade menor que 2,5% da espessura, ou seja, no máximo 0,05mm.

4.2.3 Análise resultados CHAPA C

A figura 48 apresenta-se a metalografia da CHAPA C, que é um aço com um valor considerável de carbono, além de propriedades de alta resistência à tração e que contém camada de zinco.

Figura 48 - Metalografia CHAPA C



**Amostra 11
Ponto 4**

FONTE: O autor

Na figura 49 podemos observar a estrutura dos grãos do metal-base. Os grãos são retilíneos e com dimensões constantes.

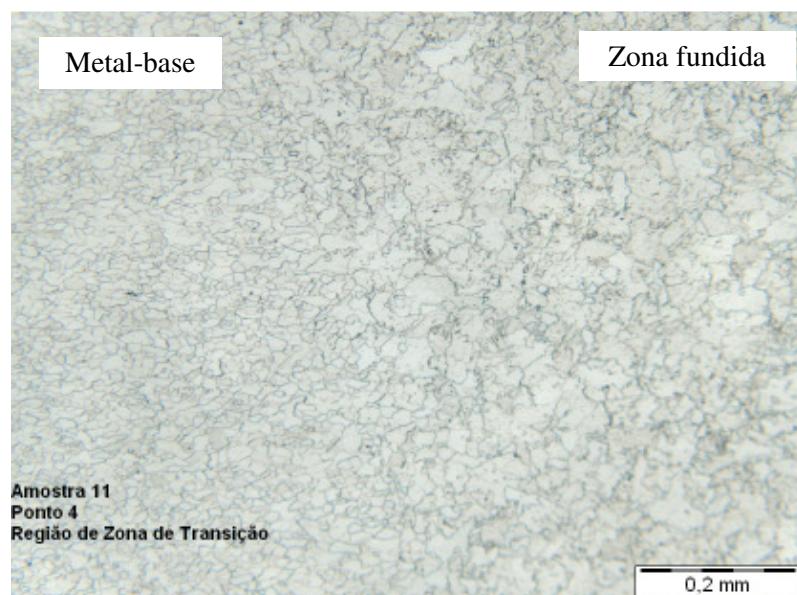
Figura 49 - Metal-base CHAPA C



FONTE: O autor

Na figura 50, verificamos também o aumento do grão desuniforme na região da zona de transição, não tendo um aumento gradual dos grãos, mas sim abrupto.

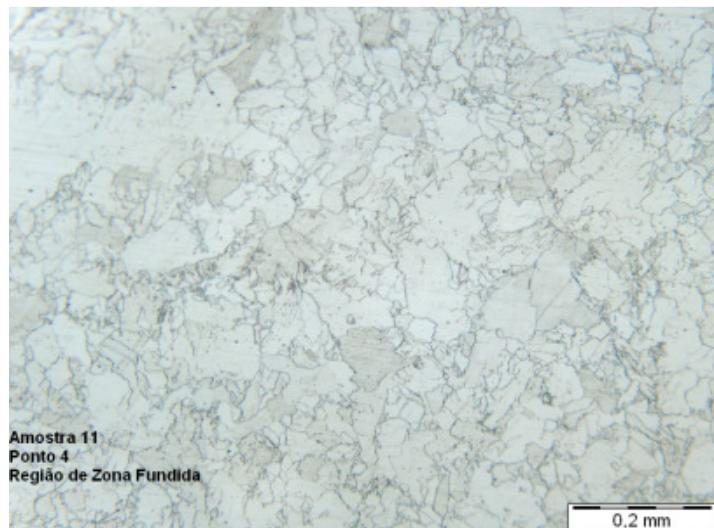
Figura 50 - Zona de transição CHAPA C



FONTE: O autor

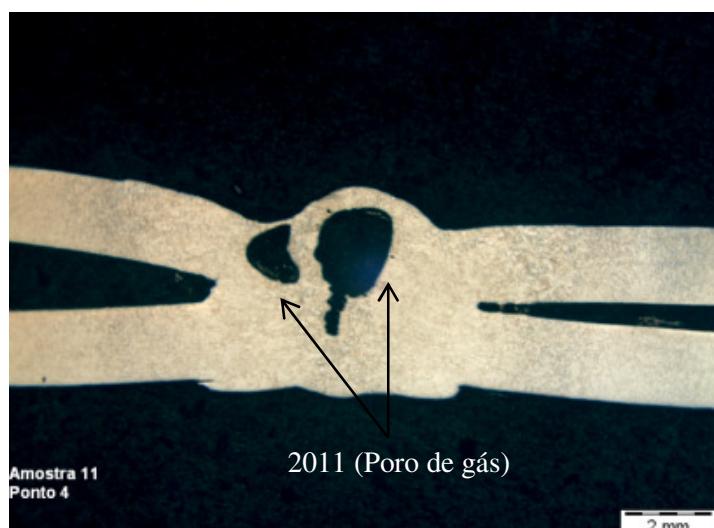
O formato dos grãos também foi planar com algumas formações dentríticas, fenômeno verificado nas outras chapas.

Figura 51 - Zona fundida CHAPA C



FONTE: O autor

Na CHAPA C novamente foi verificado um grande poro de gás, mostrando que este modo de falha não depende do material e da proteção superficial.



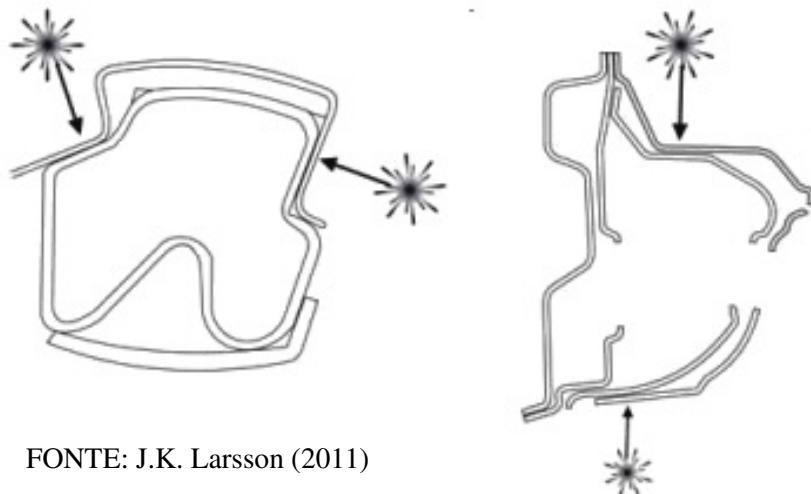
FONTE: O autor

5 CONCLUSÕES

Verificou-se que nos testes realizados que é possível realizar a operação de soldagem com plasma. As possibilidades de soldagem por um lado são importantes para as necessidades de redução de volume e custos em geral.

Com esta opção de processo, é possível executar aplicações de produção em série como em produção de protótipos.

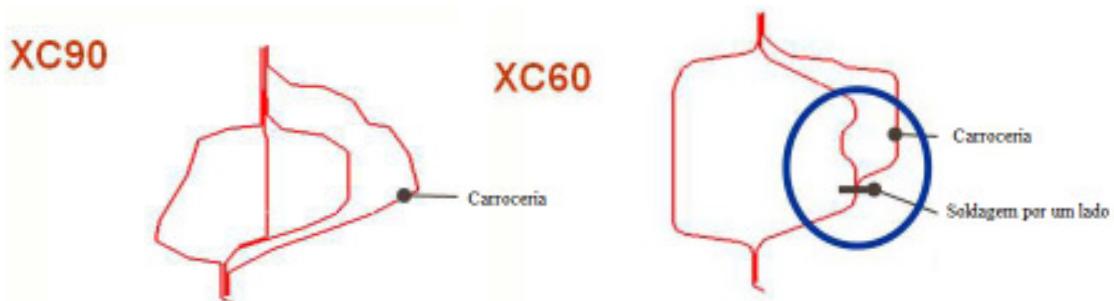
Figura 52 - Opções de aplicação de soldagem por um lado



FONTE: J.K. Larsson (2011)

As possibilidades de redução de custo e massa de uma carroceria veicular, como no exemplo abaixo.

Figura 53 - Possibilidade de diminuição de massa



FONTE: J.K. Larsson (2011)

Com base nos resultados realizados, conclui-se:

- As condições dos parâmetros de soldagem são essenciais para o sucesso da soldagem a ponto com plasma. O tempo de corrente é variável essencial para a qualidade do ponto, o que foi mostrado em todas as amostras, e o ajuste dos valores, dependendo da espessura ou da camada de zinco;
- O assentamento perfeito das chapas também tem a importância grande, visto que aberturas mínimas não deixam a formação do ponto de solda ser perfeita;
- Contudo, este assentamento perfeito também não permite a saída da forma mais eficiente dos gases que ficam dentro da poça de fusão, e este problema deve ser material de mais estudos, visto que existem tochas especiais para este processo;
- Não há relação dos poros provenientes dos gases com a camada de zinco e a composição química das chapas, conforme apresentados nos resultados apresentados nos testes;
- A qualidade dos pontos de solda dependem de vários fatores: diâmetro do ponto de solda, aspecto visual (indentação, rebarbas, expulsão de material, fusão na superfície), e a ausência de defeitos internos, como poros e trincas, aos quais não são detectados pelo teste de arrancamento;

6 TRABALHOS FUTUROS

Os resultados obtidos através deste estudo não têm a pretensão de encerrar o assunto. Esta pesquisa buscou apresentar alguns resultados, com o objetivo de trazer uma contribuição para que futuros pesquisadores possam pesquisar com maior profundidade o assunto de soldagem a ponto com Plasma.

Contudo, podem-se sugerir alguns temas que surgiram no decorrer deste estudo.

- Melhores tipos de gases para aplicação do ponto de solda plasma;
- Refinamento dos parâmetros para melhor eficiência da soldagem;
- Comparação de tempo de fabricação com o ponto de solda por resistência e o ponto de solda plasma;
- Comparação financeira do ponto de solda por resistência e ponto de solda plasma;
- Quantidade de ponto de solda plasma feitas continuamente (duração do eletrodo)

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AURES, J. E. (2006). **Estudo da formação, geometria e resistência do ponto na soldagem por resistência: uma abordagem estatística.** Universidade de Brasilia, Departamento de Engenharia Mecânica. Brasília: Universidade de Brasilia.
- AWS. (2005). **SURVEY OF JOINING, CUTTING, AND ALLIED PROCESSES.** Miami: AWS.
- BRANCO, H. L. (2004). **Avaliação de capas de eletrodos utilizadas na soldagem por resistência elétrica de chapas galvanizadas automotivas.** Universidade Federal do Paraná, Departamento de Engenharia Mecânica. Curitiba: Universidade Federal do Paraná.
- BRANDI, S. D. (2004). Soldagem por resistência. In: E. Wainer, S. D. Brandi, & F. D. Homen de Mello (Eds.), **Soldagem, processos e metalúrgia** (4^a ed., p. 494). São Paulo, São Paulo, Brasil: Editora Edgard Blücher Ltda.
- CETEC/FINEP. (2013). **Ciências dos materiais multimídia.** Acesso em 15 de Maio de 2013, disponível em <http://www.cienciadosmateriais.org/>
- EWI Group. (5 de Junho de 2013). **Produkte.** Acesso em 05 de Junho de 2013, disponível em <http://www.ewm-group.com/de/ewmprodukte.html>
- Houldcroft, P. T. (1977). **Welding Process Technology** (1^a ed ed.). England: Cambridge University Press.
- IMC SOLDAGEM. (2011). **Módulo PLASMA.** Acesso em 05 de Junho de 2013, disponível em <http://www.imc-soldagem.com.br/modplasma.html>
- LARSSON, J. K. (2011). **High Quality Welding of Weight Optimized Passenger Car Bodies – an Important Enabler for Producing the Most Fuel Efficient and Environmental Friendly Products in the Business.** Swedish Welding Commission, VII(10), 33.
- MODENESI, J., & BRACARENSE, Q. A. (2007). **Introdução à Física do Arco Elétrico E sua Aplicação na Soldagem dos Metais.** Belo Horizonte: UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS.
- MODENESI, P. J., & MARQUES, P. V. (2006). **Introdução aos Processos de Soldagem.** UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS, Departamento de Engenharia Metalúrgica. Belo Horizonte: UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS.

- REIS, R. P., & SCOTTI, A. (2007). **Fundamentos e prática da soldagem a plasma** (1^a ed.). São Paulo, São Paulo, Brasil: Artliber Editora Ltda.
- RUIZ, D. C., & BATALHA, G. F. (2004). **Estudo de um critério de modo de falha para solda a ponto por resistência**. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- RUUKI Co. (2009). **Resistance Welding Manual**. Helsinki: Rautaruuki Corporation.
- SBI GmbH. (2010). **PLASMA SPOT WELDER PSW-500**. Hollabrunn: SBI Produktion technisch Anlagen GmbH.
- SCOTTI, A. (2010). **O Arco Voltaico e a Física do Arco I**. Uberlândia: LAPROSOLDA.
- SCOTTI, A., & PONOMAREV, V. (2008). **Soldagem MIG/MAG** (1^a ed.). São Paulo: Artliber Editora.
- ZIEBELL, F. L. (2004). **O quarto estado da matéria** (1^a ed.). Porto Alegre: Instituto de Física, UFRGS.
- _____. **DIN EN 10130**: Produtos planos laminados a frio de aços de baixo teor carbônico para conformação a frio. Condições técnicas de fornecimento. Bruxelas, 2006. 16 p.
- _____. **DIN EN 10346**: Continuously hot-dip coated steel flat products - Technical delivery conditions. Brussels, 2009. 37 p.
- _____. **DIN EN 10292**: Continuously hot-dip coated strip and sheet of steels with high yield strength for cold forming-Technical delivery conditions. Brussels, 2007. 26 p.
- _____. **DIN EN ISO 6520-1**: Welding and allied processes – Classification of geometric imperfections in metallic materials – Part 1: Fusion welding. Brussels, 2007. 58 p.
- _____. **DIN EN ISO 5817**: Welding – Fusion-welded joints in steel, nickel, titanium and their alloys (beam welding excluded) – Quality levels for imperfections. Brussels, 2012. 36 p.
- _____. **DIN EN ISO 6520-2**: Welding and allied processes – Classification of geometric imperfections in metallic materials – Part 2: Welding with pressure. Brussels, 2012. 29 p.