



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
CIÊNCIAS E ENGENHARIA DE MATERIAIS

**AVALIAÇÃO DAS TÉCNICAS DE SOLDAGEM MIG-P CA E MIG-P CC+
APLICADAS AO PASSE DE ENCHIMENTO EM LIGA DE ALUMÍNIO AA5083**

RAMON FERNANDES FAGUNDES

Orientador: Rubens Maribondo do Nascimento

Dissertação n° 148/PPgCEM

Natal/RN
Julho de 2014

RAMON FERNANDES FAGUNDES

**AVALIAÇÃO DAS TÉCNICAS DE SOLDAGEM MIG-P CA E MIG-P CC+
APLICADAS AO PASSE DE ENCHIMENTO EM LIGA DE ALUMÍNIO AA5083**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Rubens Maribondo do Nascimento

Coorientadora: Prof^a. Dr^a. Celina Leal Mendes da Silva

Natal/RN
Julho de 2014

Aos meus pais, Evandro Fagundes e Maria
Adriana Fernandes Fagundes.

AGRADECIMENTOS

A Deus que me iluminou e me deu forças para não desistir diante das barreiras por todos esses anos;

A minha família, pela confiança e apoio depositados em mim;

A Ana Raine que me apoiou durante todo esse período;

Ao meu orientador Prof. Dr. Rubens Maribondo do Nascimento por ter confiado e auxiliado sempre que necessário;

A minha coorientadora Prof^a. Dra. Celina Leal Mendes da Silva pela atenção e conhecimentos passados e principalmente pela paciência que teve comigo;

Ao professor Jair Carlos Dutra, pela oportunidade em participar do grupo LABSOLDA;

A toda a equipe do LABSOLDA, em especial a Diego, Erick, Cleber Merques, Bruna e Direne;

A todo quadro docente do PPgCEM pelos ensinamentos e disponibilidade em ajudar;

Aos meus amigos, pela paciência, por tolerar a minha impaciência e ficar do meu lado sempre;

A Pedro Henrique Sales da Costa pelo apoio nesse trabalho;

A CAPES pela disposição da bolsa para execução deste projeto.

E a todos aqueles que me ajudaram de forma indireta para conclusão deste trabalho.

RESUMO

Por conter propriedades benéficas, as ligas de alumínio vêm ganhando cada vez mais espaço em diferentes áreas industriais, se tornando alvo de estudo nos mais diversos campos acadêmicos. Quando relacionadas a soldagem, estas ligas apresentam algumas peculiaridades que podem vir a dificultar a união, como por exemplo a camada microscópica de óxido presente na superfície do metal. O processo de soldagem MIG, também conhecido como GMAW, possui versões desenvolvidas que podem ser eficazes para soldagem do alumínio. Sabendo disto, para este trabalho foram escolhidas duas versões do processo MIG pulsado (CC+ e CA) para avaliar qual melhor se adequa ao passe de enchimento de chanfro em chapas de alumínio AA5083 com 8 e 12 mm de espessura respectivamente. Além disso, foram avaliados dois tipos de arames, ER5087 e ER5183. Para avaliar as versões de processo e os arames, foram utilizadas as câmeras de alta velocidade e térmica a fim de monitorar a transferência metálica e o comportamento térmico respectivamente, além da análise metalográfica para visualização macrográfica dos cordões de solda e do ensaio não destrutivo por radiografia para observação de possíveis descontinuidades. Foi constatado que a técnica de soldagem MIG-P CA apresentou melhores resultados à frente da outra técnica em ambas as condições de soldagem impostas. Quando relacionado aos arames, estes apresentaram resultados semelhantes, com cordões uniformes e sem descontinuidades.

Palavras-chave: Consumível. Processo GMAW. MIG-P CC+. MIG-P CA. Alumínio naval.

ABSTRACT

For contain beneficial properties, aluminum alloys are gaining more importance in different industrial areas, becoming the subject of study in several academic fields. When related to welding these alloys have some peculiarities that may hinder the union, such as microscopic oxide layer present on the metal surface. The MIG welding process, also known as GMAW, has developed versions that can be effective for welding aluminum. Knowing this, for this paper, two versions of pulsed MIG (CC + and CA) were chosen to evaluate which best suits pass by filling bevel on AA5083 aluminum sheets with 8 and 12 mm thick respectively. Furthermore, two types of wire, ER5087 and ER5183 were evaluated. To evaluate the process and versions of the wires, the high-speed cameras and thermal were used to monitor the metal transfer and the thermal behavior respectively, and the metallographic analysis for macrographic view of the weld beads and non-destructive testing by radiography for observation of possible discontinuities. It was found that the technique of MIG-P CA showed better results ahead of another technique both welding conditions imposed. When connected to the wires, they showed similar results, with uniform cords and seamless.

Key word: Consumables. Process GMAW. MIG-P CC+. MIG-P CA. Aluminum shipbuilding

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Representação do processo MIG/MAG	27
Figura 2.	Forma de onda característica da técnica MIG-P CC+	29
Figura 3.	Comportamento do arco voltaico nas polaridades positiva e negativa	30
Figura 4.	Forma de onda característica da técnica MIG-P CA	31
Figura 5.	Esquema do controle sinérgico	33
Figura 6.	Variação da corrente na soldagem MIG-P com pulsação dupla	34
Figura 7.	Intervalos típicos da taxa de deposição de cada processo de soldagem	36
Figura 8.	Dimensões dos corpos de prova	40
Figura 9.	Ponto de solda em uma das extremidades dos corpos de prova	41
Figura 10.	Secção retirada de cada corpo de prova para visualização posterior	46
Figura 11.	Fonte de soldagem utilizada no trabalho	47
Figura 12.	Sistema de Aquisição Portátil IMC	48
Figura 13.	Bancada de soldagem com a câmera de alta velocidade	49
Figura 14.	Câmera de alta velocidade e conjunto de LEDs	49
Figura 15.	Câmera térmica	50
Figura 16.	Bancada de soldagem com a câmera de alta velocidade	51
Figura 17.	Bancada de soldagem com a câmera térmica	51
Figura 18.	Fluxograma da fonte para as versões utilizadas	52
Figura 19.	Fluxograma da fonte para a versão MIG Convencional	53
Figura 20.	Passe de raiz realizados nos corpos de prova com o MIG CMT (A: 8 mm e B: 12 mm)	55

Figura 21.	Oscilograma de tensão e corrente durante a transferência metálica com arame ER5183	56
Figura 22.	Oscilograma de tensão e corrente durante a transferência metálica com arame ER5087	57
Figura 23.	Imagens térmicas e curvas do ciclo térmico das técnicas MIG-P com o arame ER5183	59
Figura 24.	Imagens térmicas e curvas do ciclo térmico das técnicas MIG-P com o arame ER5087	59
Figura 25.	Cordões de solda com o arame ER5183 (A: Face superior - B: Face inferior)	61
Figura 26.	Cordões de solda com o arame ER5087 (A: Face superior - B: Face inferior)	61
Figura 27.	Macrografia com a técnica MIG-P CA utilizando o arame ER5183	62
Figura 28.	Macrografia com a técnica MIG-P CC+ utilizando o arame ER5183	63
Figura 29.	Macrografia com a técnica MIG-P CA utilizando o arame ER5087	64
Figura 30.	Macrografia com a técnica MIG-P CC+ utilizando o arame ER5087	65
Figura 31.	Microdurezas com a técnica MIG-P CC+ com o arame ER5087	66
Figura 32.	Microdurezas com a técnica MIG-P CC+ com o arame ER5183	66
Figura 33.	Microdurezas com a técnica MIG-P CA com o arame ER5087	67
Figura 34.	Microdurezas com a técnica MIG-P CA com o arame ER5183	67
Figura 35.	Radiografias dos cordões de solda com o arame ER5183 utilizando a técnica MIG-P CC+	68
Figura 36.	Radiografias dos cordões de solda com o arame ER5183 utilizando a técnica MIG-P CA	68

Figura 37.	Radiografias dos cordões de solda com o arame ER5087 utilizando a técnica MIG-P CC+	68
Figura 38.	Radiografias dos cordões de solda com o arame ER5087 utilizando a técnica MIG-P CA	69
Figura 39.	Porosidade	69
Figura 40.	Ensaio radiográfico realizado no corpo de prova soldado com a técnica MIG-P CA	70
Figura 41.	Oscilogramas de tensão e corrente durante a transferência metálica no primeiro passe de enchimento	70
Figura 42.	Oscilogramas de tensão e corrente durante a transferência metálica no segundo passe de enchimento	71
Figura 43.	Comportamento térmico no primeiro passe de enchimento	72
Figura 44.	Comportamento térmico no segundo passe de enchimento	73
Figura 45.	Cordões de solda com a técnica MIG-P CA	74
Figura 46.	Cordões de solda com a técnica MIG-P CC+	74
Figura 47.	Macrografia com a técnica MIG-P CA	75
Figura 48.	Macrografia com a técnica MIG-P CC+	76
Figura 49.	Microdureza obtida na chapa de 12 mm com a técnica MIG-P CA	77
Figura 50.	Microdureza obtida na chapa de 12 mm com a técnica MIG-P CC+	77
Figura 51.	Cordão de solda com a técnica MIG convencional	78
Figura 52.	Cordão de solda com a técnica MIG convencional	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.	Classificação das ligas de alumínio	23
Tabela 2.	Valores de ϕ para diferentes processos de soldagem	35
Tabela 3.	Composição química dos consumíveis ER5183 e ER5087	38
Tabela 4.	Composição química da liga de alumínio AA5083	39
Tabela 5.	Parâmetros utilizados para realização dos passes de raiz nos corpos de prova	41
Tabela 6.	Valores de K para cada espessura	42
Tabela 7.	Parâmetros utilizados para o passe de enchimento dos corpos de prova de 8 mm	43
Tabela 8.	Parâmetros utilizados para os passes de enchimento dos corpos de prova de 12 mm	44
Tabela 9.	Parâmetros utilizados para o passe de enchimento com a versão MIG Convencional	45
Tabela 10.	Características técnicas da fonte de soldagem	48
Tabela 11.	Aquisições dos valores eficazes e médios pelo SAP	57
Tabela 12.	Taxa de deposição de material (Kg/h)	58
Tabela 13.	Valores calculados do aporte térmico (KJ/mm) para chapa de 8 mm	60
Tabela 14.	Aquisições dos valores eficazes e médios pelo SAP pra os passes de enchimento	71
Tabela 15.	Taxa de deposição de material (Kg/h)	72
Tabela 16.	Valores calculados do aporte térmico (KJ/mm) para chapa de 12 mm	73
Tabela 17.	Aquisições dos valores eficazes e médios pelo SAP utilizando a técnica MIG convencional	78

TERMOLOGIAS E SIMBOLOGIA

TIG	Tungsten Inert Gas
MIG	Metal Inert Gas
MIG-P CC+	MIG Pulsado com corrente continua positiva
MIG-P CA	MIG Pulsado com corrente alternada
CC-	Corrente continua negativa
AA	Aluminum Association
MAG	Metal Active Gas
GMAW	Gas Metal Arc Welding
SAMG	Soldagem a Arco Metálico com Atmosfera Gasosa
TWI	The Welding Institute
IIW	Internacional Institute of Welding
TEBEF	Teoria Balanço Estático de Forças
TIP	Teoria da Instabilidade Pinch
Z_m	Taxa de deposição
ϕ	Eficiência de deposição
W_m	Taxa de fusão
W	Velocidade de fusão
SAW	Soldagem a Arco Metálico com Atmosfera Gasosa
GTAW	Gas Tungsten Arc Weldin
CMT	Cold Metal Transfer
Gap	Abertura de raiz
V_a	Velocidade de alimentação
V_s	Velocidade de soldagem
SAP	Sistema de Aquisição Portátil
I	Corrente
U	Tensão
a	Tensão de referência
DBCP	Distância bico contato peça
K_s	Efeito indutivo de subida
K_d	Efeito indutivo de decida
ρ	Densidade
V_{am}	Velocidade média de arame
I_{ef}	Corrente eficaz
U_{ef}	Tensão eficaz
K	Constante da deposição de material

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1.	Taxa de deposição	35
Equação 2.	Taxa de fusão	36
Equação 3.	Taxa de deposição de material	46
Equação 4.	Aporte térmico	47

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	15
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
2.1	Alumínio	20
2.1.1	Classificação do alumínio	22
2.1.2	Dificuldades encontradas na soldagem em alumínio	24
2.2	Processo de soldagem MIG/MAG	26
2.2.1	Processo MIG-P CC+	28
2.2.2	Processo MIG-P CA	30
2.3	MIG pulsado sinérgico	32
2.4	MIG pulsado modo adaptativo	34
2.5	Métodos para cálculo da produtividade	35
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	38
3.1.	Arames	38
3.2	Gás de proteção	39
3.3	Corpos de prova	39
3.3.1	Passe de raiz	40
3.4	Passe de enchimento	42
3.4.1	Mecanismos utilizados para o passe de enchimento	42
3.4.2	Passe de enchimento utilizando a versão MIG Convencional	43
3.4.2.1	Passe de enchimento utilizando a versão MIG Convencional	44
3.5	Mecanismos adotados para avaliação da solda	45
3.6	Equipamentos	47
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	55
4.1	Resultados preliminares	55
4.1.1	Corpos de prova	55
4.2	Análise dos arames ER5183 e ER5087	56
4.3	Avaliação do passe de enchimento nos corpos de prova com espessura de 12 mm	69
4.4	Avaliação da técnica MIG convencional aplicada ao passe de enchimento nos corpos de prova com espessura de 12 mm	78
5.	CONCLUSÕES	81
	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	82
	REFERÊNCIAS	83

Capítulo 1***Introdução***

1 INTRODUÇÃO

O alumínio e suas ligas hoje representam uma grande parcela da matéria prima utilizada na fabricação de diversos produtos que vai desde utensílios domésticos até componentes de alta performance em carros e aeronaves. Na indústria naval e petrolífera em especial, o alumínio e suas ligas vêm ganhando ainda mais destaque por oferecer propriedades cobiçadas neste setor, tais como ótima resistência a corrosão e baixa densidade.

Quando comparado com outros materiais, o alumínio é um material caracterizado pela baixa densidade (da ordem de $2,8 \text{ g/cm}^3$), elevada relação resistência/peso, excelente resistência à corrosão, elevadas condutividade térmica e elétrica, alta refletividade tanto para o calor quanto para a luz visível, por não ser magnético e por possuir um coeficiente de expansão térmica de aproximadamente o dobro do aço (BILONI. et al 1981).

No entanto, quando relacionado à soldagem, o alumínio apresenta alguns aspectos particulares que dificultam a mesma. A camada microscópica de óxido (Al_2O_3 ou alumina) formada na superfície do metal e a expansão térmica são exemplos de fatores que podem dificultar ou até mesmo comprometer a soldagem das ligas de alumínio.

No que diz respeito à soldagem, faz-se necessário, inevitavelmente, a remoção deste filme óxido. Neste ponto, dois aspectos importantes devem ser abordados. Um está relacionado aos efeitos que as propriedades físicas do óxido de alumínio exercem sobre as características metalúrgicas da junta soldada e estas, por conseguinte, nas propriedades mecânicas da união e na geração de porosidade, ou seja, sobre a qualidade da junta. O outro está ligado às consequências da sua presença (ou ausência) e quantidade (espessura) sobre a estabilidade do arco de soldagem. A instabilidade do arco afeta a qualidade, tanto pelo fato de ser uma das causas da porosidade, como por ser determinante na geometria cordões de solda (REIS, 1996).

O óxido de alumínio é péssimo condutor de eletricidade, por isso sua presença dificulta o fluxo de corrente. Supõe-se que, em uma soldagem, o arco

tenda a acompanhar a poça de fusão e as regiões adjacentes, onde a espessura da camada de óxido seja menor. Como o metal abaixo da superfície funde-se primeiro, pode-se prever um caráter bastante errático do arco tentando acompanhar as posições com menor espessura da camada de óxido. Esta mobilidade pode tornar o arco mais instável (VIEIRA, 1999).

Outro fator de importância é a condutividade térmica do alumínio e suas ligas que por ser elevada, pode se tornar uma problemática na soldagem. SILVA (2003) afirma que a alta condutividade térmica do alumínio pode levar a problemas característicos no início do cordão como aparência insatisfatória, penetração insuficiente e reforço excessivo.

Desta forma, pode-se citar alguns processos de soldagem que são comumente aplicados a esse metal e suas ligas, Tungsten Inert Gas (TIG) e Metal Inert Gas (MIG). Este último, alvo de estudo no presente trabalho, apresenta duas características que o torna o processo mais utilizado atualmente, tais como: Pode ser mecanizado com certa facilidade e apresenta alta produtividade, pois possui uma alta taxa de deposição e alto fator de trabalho do soldador.

Quando relacionado a soldagem nas ligas de alumínio, o processo MIG possibilita a abertura e manutenção do arco estável, além de conseguir retirar a camada de alumina presente na superfície da peça a ser soldada e manter, a partir do gás de proteção inerte, a poça de fusão protegida da oxidação.

Graças ao desenvolvimento técnico-científico na área da soldagem MIG, hoje existem inúmeras técnicas deste processo específicas para determinados casos, tais como o MIG Pulsado com corrente contínua e o MIG Pulsado com corrente alternada que podem ser utilizados no modo sinérgico adaptativo (modo de controle para manter a altura do arco constante).

A técnica de soldagem MIG Pulsado com corrente contínua positiva (MIG-P CC+) é caracterizada por ser um método controlado de transferência metálica goticular, na qual a corrente é mantida em um valor alto (pulso) por tempo suficiente para permitir a formação e o destacamento de uma gota metálica. Uma vez destacada a gota metálica, a corrente é reduzida para um valor de corrente

relativamente baixo, mas suficiente para manter o arco aberto (base) e a poça de fusão aquecida (PALANI, 2005).

O MIG Pulsado com corrente alternada (MIG-P CA) por sua vez, combina as vantagens da soldagem MIG convencional (CC+) com o aumento na taxa de deposição e redução do aporte térmico que ocorrem quando o processo MIG é operado com o eletrodo no modo polaridade negativa (CC-) (MULLIGAN, 2003). Quando aplicadas na fabricação de embarcações a partir de ligas de alumínio, estudos científicos ainda são escassos nesta área.

Falta, portanto, explorar a versão CA, sobretudo na soldagem de materiais que estão tendo sua utilização cada vez mais crescente, como o alumínio. Desta forma propõe-se neste trabalho avaliar o desempenho do MIG-P CA aplicado ao passe de enchimento de chanfro em juntas de cascos de embarcações em alumínio naval AA 5083 na posição vertical. Verifica-se a produtividade, através de um estudo comparativo desta variante com uma versão mais conhecida, o MIG-P CC+. Para atingir o objetivo geral, os seguintes objetivos específicos serão alvos na execução deste projeto:

1. Avaliar dois tipos de arames, ER5087 e ER5183, em ambas as versões estudadas com o intuito de estabelecer qual garante melhor estabilidade do arco durante a soldagem e como se dá o comportamento no que diz respeito a forma da transferência metálica e microestrutural;
2. Determinar um procedimento de soldagem com cada uma das versões MIGP CC+ e CA para os passes de enchimento em chapas de alumínio com 8 e 12 mm de espessura;
3. Avaliar os resultados dos procedimentos de soldagem encontrados em termos de qualidade e produtividade e repetibilidade;
4. Avaliar os resultados dos procedimentos de soldagem encontrados em termos de aporte térmico, utilizando a termografia como ferramenta de estudo;

5. Avaliar o comportamento geométrico dos cordões de solda inerentes a cada versão de soldagem nas duas espessuras.

Capítulo 2***Fundamentação Teórica***

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 ALUMÍNIO

O alumínio é um dos metais com maior abundância na crosta terrestre (8,1 %), embora não seja encontrado sobre a sua forma pura na natureza. É o terceiro elemento mais abundante depois do Oxigênio e Silício (QUINTINO, 2012). Por esse motivo e por conter propriedades bem vistas nos mais diversos setores industriais, tais como boa resistência a corrosão e baixa densidade, este metal vem ganhando cada vez mais espaço.

Na indústria naval em especial, que nos últimos anos vem ganhando grandes investimentos tanto estatal como privado, o alumínio é um grande aliado como matéria prima para fabricação dos mais diversos produtos utilizados neste setor. Isto, deve-se dentre outras propriedades, a ótima resistência a corrosão e baixa densidade, tornando-se um grande atrativo no campo naval.

As características do alumínio permitem que ele tenha uma gama de aplicações. Sua alta resistência à corrosão por exemplo, permite a utilização sem que suas propriedades sejam alteradas em uma ampla gama de produtos químicos, alimentícios e em ambientes marinhos (ABAL, 2012). Dentre as principais propriedades deste metal pode-se destacar (QUINTINO, 2012):

- Temperatura de fusão de 660°C (na pureza de 99,9 %), e um ponto de ebulição de 2500 °C. A baixa temperatura de fusão é uma vantagem em relação aos aços (temperatura de fusão de 1570 °C) pois permite uma maior facilidade na obtenção de ligas, já que a energia necessária para a fusão do material é menor;
- Tem uma resistência à corrosão elevada, pois quando exposto à atmosfera, forma naturalmente um filme auto protetor de alumina;
- Tem uma condutibilidade elétrica cerca de 60 % do cobre;
- É reciclável, não magnético;

- Densidade de $2,8 \text{ g/cm}^3$, aproximadamente $1/3$ da densidade do aço;

No entanto, o alumínio puro, ou seja, sem elementos de liga em sua composição química, não fornece propriedades mecânicas favoráveis para utilização do mesmo em alguns segmentos industriais, o que faz-se necessário a utilização de ligas ou até mesmo tratamentos térmicos para viabilizar a utilização deste metal.

O alumínio puro é um metal que apresenta uma resistência mecânica relativamente baixa, mas ductilidade elevada. Entretanto, por meio da adição de um ou mais elementos de liga, a sua resistência pode ser substancialmente aumentada, embora mantenha valores de ductilidade bastante aceitáveis. Como a maioria dos metais, o alumínio perde resistência em temperaturas elevadas. Em baixas temperaturas a resistência do alumínio aumenta sem perda de ductilidade, ou seja, a sua tenacidade não diminui com o decréscimo da temperatura (ALCAN, 1993).

Existem vários elementos que são usados na obtenção de ligas de alumínio, visando melhorar as suas propriedades em função da aplicação que lhe será reservada. Os elementos metálicos mais usados na obtenção de ligas são (ASM, 1993):

- O cobre (Cu) que promove o endurecimento a partir da precipitação, além de favorecer a condutibilidade térmica, aumentando também a sua resistência à tração e à corrosão;
- O magnésio (Mg) aumenta a dureza e a resistência à corrosão do alumínio;
- O silício (Si) torna possível a realização de tratamentos térmicos com o objetivo de melhorar a dureza e resistência mecânica do alumínio, e quando ainda combinado com magnésio, melhorar a resistência à corrosão;
- O manganês (Mn) permite aumentar a resistência mecânica do alumínio através do endurecimento por solução sólida, originando uma liga de aplicabilidade geral com boa capacidade de deformação;

- O zinco (Zn) combinando com o magnésio (Mg), forma um composto intermetálico $MgZn_2$, que é o precipitado básico responsável pelo endurecimento destas ligas quando tratadas termicamente.

As propriedades das ligas de alumínio dependem da complexa interação entre a composição química e a microestrutura desenvolvida durante a solidificação, os tratamentos térmicos e, para ligas de trabalho mecânico, do processo de deformação. Apesar do alumínio puro ser extremamente resistente à corrosão, esta decresce normalmente com o aumento do teor de elementos de liga adicionados. Por este motivo, têm sido desenvolvidos tratamentos térmicos para aumentar a resistência à corrosão de materiais com elevados teores de elementos de liga (ASM, 1993).

Desta forma, faz-se necessário uma classificação de acordo com os elementos de liga presentes ou não na composição química, bem como se tratado ou não termicamente.

2.1.1 Classificação do alumínio

Do ponto de vista de classificação do alumínio e suas ligas, esta pode ser disposta em ligas termicamente tratáveis ou não, capazes de adquirir dureza por tratamento térmico de solubilização e envelhecimento, enquanto as não tratáveis termicamente, adquirem dureza apenas através de endurecimento por solução sólida, conseqüente do encruamento da sua conformação (ASM, 1993; HATCH, 1996). Esta classificação ainda pode ser subdividida de acordo com o elemento de liga presente na composição química da liga de alumínio.

As ligas tratáveis termicamente, utilizadas neste trabalho, são as mais empregadas no setor industrial, graças a facilidade de serem encontradas nos mais diversos perfis, tais como chapas barras chatas, cantoneiras, dentre outros.

Existem diversas nomenclaturas para identificar estas ligas e a mais comum é a da Aluminum Association (AA). Ela é adotada, também, por outras entidades tais como: ASTM, SAE, ABNT, esta última corresponde à norma 6834.

Assim, conforme as normas impostas, a classificação das ligas de alumínio é formada por um conjunto de quatro números, na qual o primeiro indica o grupo de elementos que determinam as características da liga. Nas ligas do grupo 1XXX, os dois últimos dígitos indicam a porcentagem de alumínio que excede a 99%. Nos grupos de 2XXX a 8XXX, os dois últimos dígitos apenas diferenciam ligas de um mesmo grupo; o segundo dígito, quando diferente de zero, indica que uma liga é derivada daquela com o segundo dígito zero (por exemplo, a liga 5315 deriva da liga 5015) (BILONI, 1981; PÓVOA, 1988; ALCAN, 1993).

A Tabela 1 apresenta o sistema de classificação desenvolvido pela Aluminum Association que no Brasil é representada pela norma NBR6834 para as ligas de alumínio tratáveis termicamente de acordo com o principal elemento químico da liga.

Tabela 1. Classificação das ligas de alumínio (RENCK, 2005)

Liga ABNT (NBR6834)	Principal elemento químico da liga
1XXX	Alumínio Puro (Al \geq 99,0%)
2XXX	Cobre
3XXX	Manganês
4XXX	Silício
5XXX	Magnésio
6XXX	Magnésio e Silício
7XXX	Zinco
8XXX	Outros Elementos
9XXX	Série reservada para uso futuro

Para realização deste estudo, serão utilizadas ligas de alumínio derivadas da série 5XXX. Portanto a seguir será explanado sobre características inerentes a esta série.

Neste tipo de liga, o elemento principal usado é o magnésio, que pode ser adicionado até quantidades de 5% para promover o endurecimento por solução sólida do material (QUINTINO, 2012). Têm uma resistência à ruptura superior à da liga Al-Mn e são facilmente soldáveis.

Uma liga típica desta série é representada pela especificação 5038-O, cujo emprego engloba não somente as estruturas soldadas em geral, mas também os tanques de armazenamento de gases liquefeitos, como o oxigênio líquido (OKUMURA, 1982). Estas ligas possuem como propriedades mecânicas de destaque:

- Boa soldabilidade se comparada as outras ligas de alumínio;
- Alta resistência à corrosão, mesmo nas regiões soldadas;
- Boa conformabilidade à frio.

No entanto, apesar da existência de várias ligas de alumínio, derivadas de processos de conformação e elementos de liga em sua composição, existem algumas particularidades inerentes ao próprio alumínio que dificultam a soldagem destas ligas.

2.1.2 Soldabilidade de alumínio e suas ligas

Apesar de obter propriedades que são bastante procuradas nas mais diversas áreas industriais, o alumínio possui algumas particularidades quando se faz necessário soldar.

No tocante a soldagem, a alta condutividade térmica do alumínio atua como um complicador para a formação da poça de fusão e não existem maneiras de evitar-se completamente as consequências desta. O que ocorre é que, dependendo da espessura da chapa, do grau de restrição a que a junta está submetida e do nível de calor imposto, estas consequências podem tanto ser minimizadas quanto inviabilizar o componente soldado (SILVA, 2003).

A alta condutividade térmica promove cordões com baixa molhabilidade e penetração em seu início, onde o calor do arco é rapidamente distribuído pelo

material de base, dificultando a formação da poça metálica. Porém, à medida que a solda avança, o metal de base continua recebendo calor do arco, o que proporciona o aumento excessivo da penetração e molhabilidade, até o nível extremo onde a geometria do cordão torna-se inadequada, exigindo a interrupção do processo. Essa variação do cordão pode inviabilizar a soldagem em muitas situações, e por esse motivo é necessário o controle sobre a quantidade de energia imposta à peça (MARQUES, 2012).

O alumínio e suas ligas são facilmente oxidáveis e seu óxido, Al_2O_3 , tem um alto ponto de fusão. Pela formação da camada refratária de óxido, muitas vezes, na soldagem, surge o problema de falta de fusão. Devido ao alto valor de coeficiente de expansão térmica, podem ocorrer distorções residuais críticas durante a soldagem e algumas ligas são susceptíveis a formação de trincas a quente (ALCAN, 1993).

A solubilidade do hidrogênio sofre mudanças drásticas quando o alumínio passa do estado líquido para o estado sólido, gerando uma espécie de espuma durante a solidificação. Altas velocidades de soldagem podem favorecer a formação de porosidade da junta soldada. Além disso, devido à baixa densidade do alumínio, o metal em fusão não consegue expulsar a alumina (Al_2O_3), óxido aderente a superfície do material com uma densidade superior a do próprio alumínio, o que pode provocar a inclusão desfavorável de materiais estranhos no metal depositado. (OKUMURA, 1982).

A alumina possui elevado ponto de fusão (2052 °C), cerca de três vezes maior que o do alumínio puro. Este fato significa que tentar soldar o alumínio, sem primeiro remover o filme óxido, resulta na fusão do metal de base bem antes da fusão do óxido, podendo chegar à ausência completa de coalescência entre as superfícies a unir. Além disso, a baixa condutividade térmica do óxido pode dificultar o fluxo de calor e contribuir também para a falta de coalescência.

Entretanto, somente a retirada prévia deste filme óxido não é suficiente, uma vez que este possui uma acelerada cinética de crescimento, resultado da alta interação existente entre o alumínio e o oxigênio. MARQUES; MODENESI (1998) afirmam que sua espessura pode atingir aproximadamente 1/3 da final,

em apenas 15 s. Por isso, a utilização de gases inertes como proteção ao arco de soldagem, além da limpeza catódica, são fundamentais para prevenir a regeneração da alumina durante o processo.

Por ser um material bastante maleável, quando utilizado como metal de adição na soldagem MIG, faz-se necessário uma atenção redobrada, pois esse é bastante sensível, podendo vir a dobrar ou enrolar dentro do conduíte da tocha ou no mecanismo de tração.

Desta forma, quando se faz necessário a aplicação do processo de soldagem no alumínio e suas ligas, devem-se atentar as particularidades encontradas neste metal. Dentre os processos de soldagem que mais se aplicam na soldagem de alumínio, pode-se destacar o processo Metal Inert Gas (MIG).

2.2 PROCESSO DE SOLDAGEM MIG

Dentre os processos de soldagem aplicados ao alumínio, o MIG se destaca por possuir boa taxa de deposição, além de poder ser mecanizado ou até mesmo automatizado com certa facilidade.

O processo Metal Inerte Gas/Metal Active Gas (MIG/MAG), Gas Metal Arc Welding (GMAW) é um processo de soldagem por fusão caracterizado pela abertura e manutenção do arco elétrico entre o metal de base (poça de fusão quando em regime) e o metal de adição (arame maciço alimentado continuamente). Como o arame-eletrodo não apresenta revestimento (comum no processo Eletrodo Revestido) torna-se necessária à inserção de uma proteção gasosa, externa, suprida com pressão e vazão adequadas. Tal inserção é justificada na necessidade de, ao mesmo tempo, viabilizar a proteção da gota metálica e da poça de fusão contra a atmosfera vizinha ao arco voltaico e, além disso, formar e manter do arco elétrico (BARRA, 2003). A Figura 1 esquematiza o processo MIG/MAG.

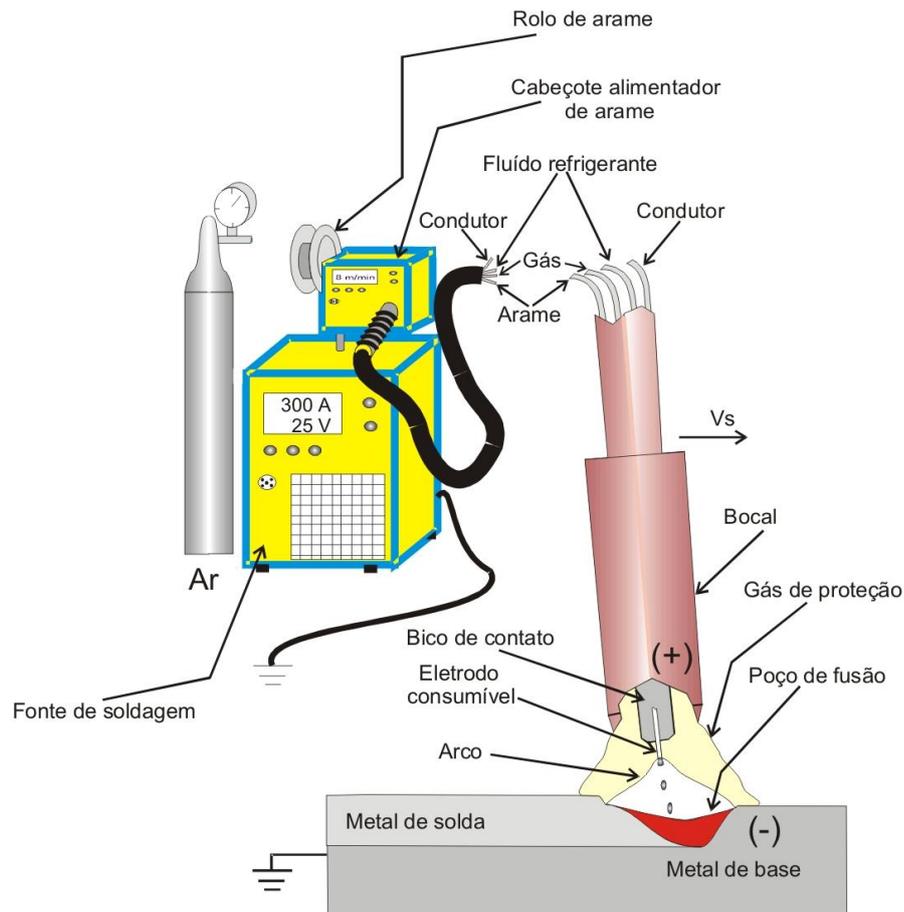


Figura 1. Representação do processo MIG/MAG (BARRA, 2003)

O termo MIG é empregado quando a proteção gasosa utilizada é composta por gases inertes (argônio, hélio ou mistura desses gases). Já o termo MAG é utilizado quando na composição do gás de proteção existem gases (CO_2 ou mistura rica deste gás) que reagem com o metal líquido do eletrodo e da poça de fusão. Para a soldagem de materiais reativos, como o alumínio, utilizam-se apenas atmosferas protetoras de gases inertes, portanto somente MIG (SILVA, 2003).

O processo é amplamente utilizado na indústria de manufatura, tendo aplicabilidade na soldagem de metais de relevante importância comercial, tais como aço carbono, aço inoxidável, alumínio e cobre (HATCH, 1996; BINGUL, 2006; ATES, 2007; KAMAL PAL, 2011). É considerado um dos processos mais

propícios à aplicação da robótica, devido à sua alta produtividade, robustez, não utilização de fluxo (ASM, 1993; HATCH, 1996; PALANI, 2005; BINGUL, 2006). A crescente robotização deste processo pode impulsionar a qualidade e a reprodutividade das juntas soldadas, a segurança operacional e a redução de custos de fabricação (ASM, 1993; HATCH, 1996). De acordo com a bibliografia existente, as principais vantagens e limitações do processo MIG/MAG são:

- Soldagem de praticamente todos os metais e ligas comerciais;
- Alimentação contínua do eletrodo;
- Soldagem em todas as posições;
- Elevadas taxas de deposição e velocidades de soldagem;
- Obtenção de cordões extensos sem muitas interrupções;
- Como não existe escória, mínima limpeza após a soldagem;
- Possibilita a utilização de robôs como forma de auxílio na soldagem;
- Maior sensibilidade à variação dos parâmetros elétricos de operação do arco voltaico;
- Equipamentos de soldagem complexos, relativamente caros e menos portáteis se comparados a outros processos de soldagem;
- Utilização mais restrita em locais de difícil acesso, devido à maior complexidade e dimensões dos equipamentos;
- O arco deverá ser protegido das correntes de ar, para garantir a eficiência de proteção realizada pelos gases empregados.

2.2.1 Processo MIG-P CC+

A modalidade MIG Pulsado (na condição corrente contínua positiva) é um método controlado de transferência metálica goticular, na qual a corrente é mantida em um valor alto (pulso) por tempo suficiente para permitir a formação e o destacamento de uma gota metálica. Uma vez destacada a gota metálica, a corrente é reduzida para um valor de corrente relativamente baixo, mas suficiente para manter o arco aberto (base) (PALANI, 2005). A Figura 2 mostra a forma de onda característica da técnica MIG-P CC+.

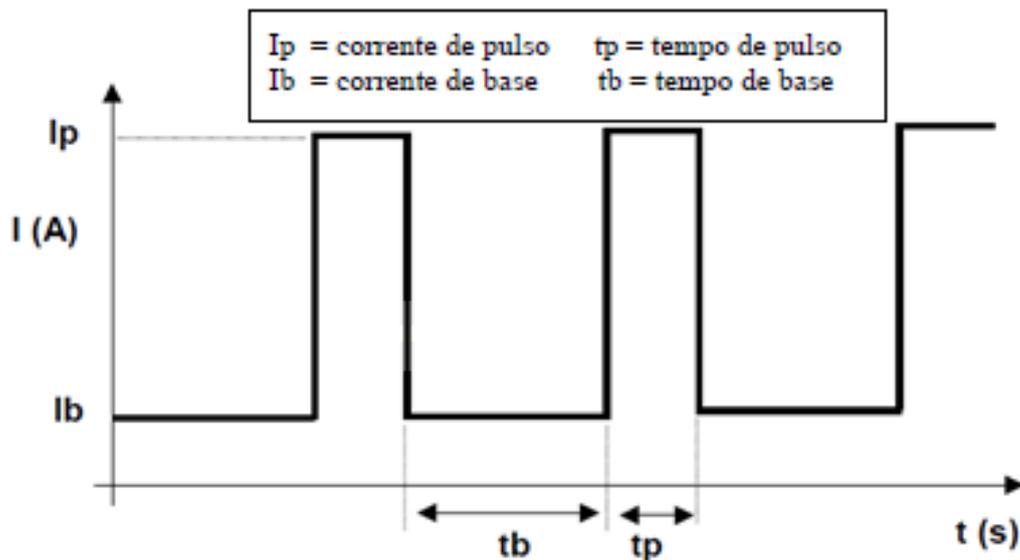


Figura 2. Forma de onda característica da técnica MIG-P CC+

Cirino (2009) afirma que o uso do processo MIG/MAG com corrente contínua e eletrodo ligado ao polo negativo (CC-) incorre em grandes diferenças em relação à sua utilização em corrente contínua e eletrodo ligado ao polo positivo (CC+). Estas diferenças são notáveis na transferência metálica, na taxa de fusão de arame-eletrodo e na geometria do cordão de solda resultante. Por exemplo, a profundidade de penetração da zona fundida, realizada com MIG/MAG CC- é menor em relação a outra realizada com MIG/MAG CC+ nas mesmas condições de soldagem, pois há menor energia imposta à peça. Isso pode ser um aspecto indesejável na maioria das aplicações, onde há a necessidade de unir duas peças, assegurando a continuidade física da junta.

Em relação ao comportamento do arco voltaico, se comparadas as duas polaridades, pode-se perceber uma diferença de altura do mesmo (Figura 2). Como pode ser visto no trabalho de CIRINO (2009), na condição CC+ o ponto de contato do arco com o eletrodo toma lugar na sua extremidade (neste caso, o ânodo), envolvendo apenas a gota metálica em formação. Este fato contribui de forma significativa para a estabilidade de arco encontrada nesta condição, pois a ação da força eletromagnética, responsável pelo destacamento, age de forma bastante pronunciada sobre a gota de metal líquido. Na condição CC-, o

arco salta para a extensão sólida do eletrodo (neste caso, o cátodo), buscando pontos onde a emissão de elétrons seja favorecida pela presença de óxidos (pontos catódicos).

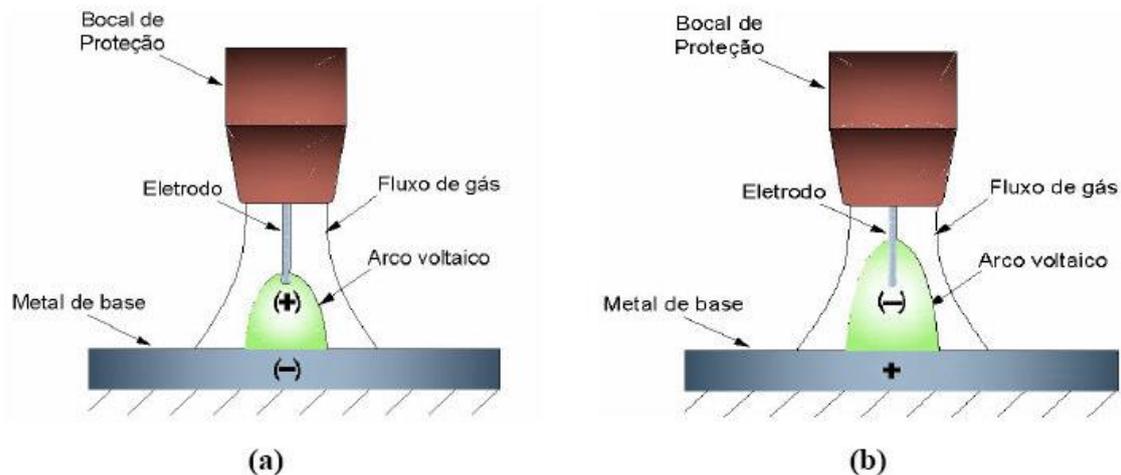


Figura 3. Comportamento do arco voltaico nas polaridades positiva e negativa (CIRINO, 2009)

Na soldagem do alumínio e suas ligas é preciso inicialmente limpar a camada de óxido, pois a mesma tem alto ponto de fusão. No processo MIG consegue-se solucionar este problema utilizando corrente contínua com eletrodo no positivo (CC+). Nesta situação o arco remove a camada de óxido de alumínio e permite a coalescência das bordas da junta e do metal de enchimento (ALTSHULLER, 1998). Este tipo de remoção da camada de óxido é chamada de limpeza catódica. Quando a soldagem é feita em CC+ o principal mecanismo de emissão de elétrons é chamado de emissão por campo, ou seja, os elétrons são emitidos da peça de trabalho para o eletrodo, resultando em uma maior limpeza catódica durante a soldagem.

2.2.2 Processo MIG-P CA

Esta técnica é caracterizada por aliar as propriedades do MIG-P CC+ (limpeza catódica) e CC- (maior fusão de material) para a obtenção da solda com

qualidade. Dentre as vantagens do processo MIG-P CA, HARRIS (2001) cita a possibilidade de controlar a penetração mediante a variação do balanço entre polaridade positiva e negativa e a capacidade de soldar juntas com frestas de até duas vezes a espessura das chapas. A redução da penetração decorrente do aumento do percentual de tempo em polaridade negativa no processo MIG CA, também constatada por MULLINGAN (2003) e FARIAS et al (2005). A Figura 4 ilustra o comportamento da onda característica da técnica MIG-P CA.

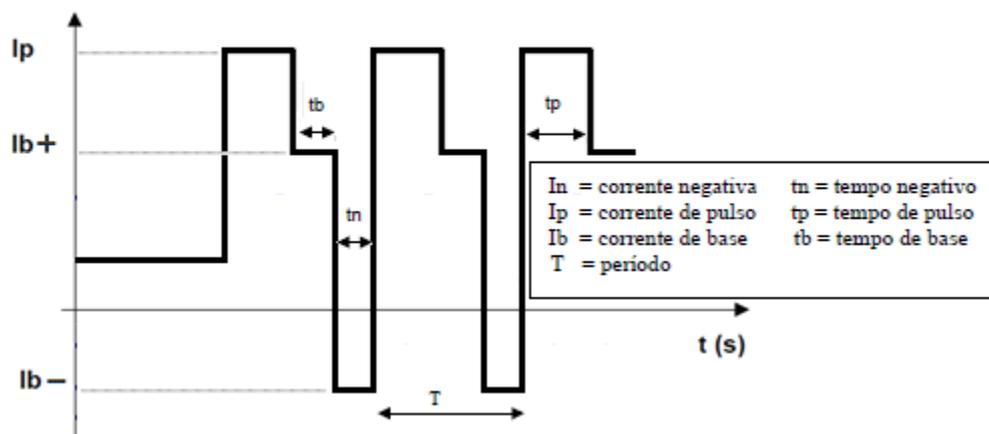


Figura 4. Forma de onda característica da técnica MIG-P CA

A possibilidade de controlar o tempo de polaridade positiva ou negativa, favorece a utilização desta técnica na soldagem de chapas finas, já que quanto maior o tempo na polaridade negativa, menor a penetração e maior a taxa de fusão.

Conforme HILTUNEN E PIETIKÄINEN (1979), o uso da polaridade negativa, comparada à outra polaridade, resulta em maior taxa de fusão do arame, devido a uma maior eficiência na transferência de calor do arco para o arame. Desta forma, com a possibilidade de controlar o tempo de polaridades na técnica MIG-P CA, possibilita ao operador um controle da taxa de fusão em CC- e da remoção da camada de óxido em CC+ dependendo do que se faz mais necessário.

2.3 MIG PULSADO SINÉRGICO

Na soldagem MIG-P tanto CA quanto CC+, as condições de transferência dependem dos parâmetros de pulsação da corrente imposta durante a soldagem. Estes, por sua vez, estão relacionados entre outros fatores, da composição e diâmetro do arame, além do gás utilizado. Desta forma, a escolha dos parâmetros, tais como corrente de pico, tempo de pico, corrente de base e tempo de base, demandam tempo e muitas vezes se tornem complexos e até mesmo inviáveis se utilizados equipamentos convencionais.

Desta forma, o desenvolvimento das fontes controladas eletronicamente permitiu uma revolução nos métodos de controle utilizados na soldagem MIG-P, viabilizando assim a sua utilização em escala industrial.

O modo de controle sinérgico, uma das primeiras praticas utilizadas na soldagem MIG-P, foi desenvolvida no The Welding Institute (TWI - Inglaterra) na década de 60.

Segundo MODENESI (2005), o termo inicialmente englobava um grupo de técnicas de controle através das quais o valor e a estrutura da corrente pulsada eram determinados com base no valor da velocidade de alimentação de arame medida com um sensor. Para isto, as regras para a seleção das condições de soldagem ("algoritmo sinérgico") ficavam armazenadas na máquina de soldagem as quais, uma vez estabelecidos o material e diâmetro do eletrodo e o tipo de gás de proteção, determinariam as condições de soldagem com base na velocidade de alimentação do arame.

Desta forma, pôde-se conceber um equipamento com ajuste em um controle único ("one-knob machine") aliviando o operador da necessidade de especificar as variáveis de pulsação da corrente. A Figura 5 mostra um esquema do controle sinérgico aplicado a fonte de soldagem.

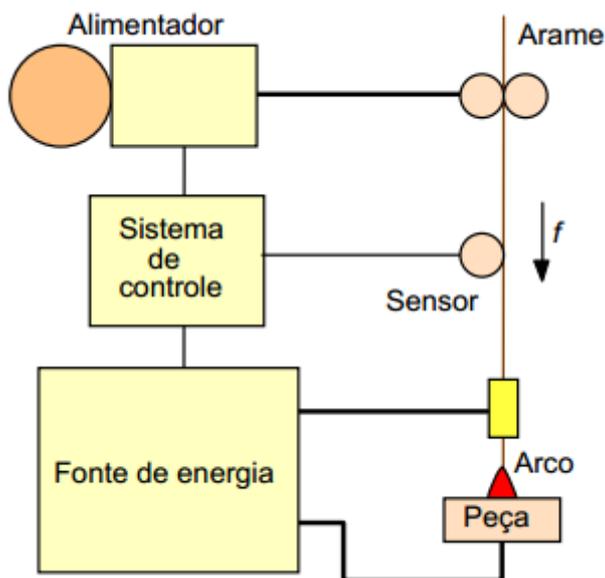


Figura 5. Esquema do controle sinérgico (MODENESI, 2005)

NORRISH (1992) considera o MIG Sinérgico, a princípio, um método de simplificar a operacionalidade do processo MIG, particularmente no modo de transferência pulsada. Esse desenvolvimento pode permitir que os benefícios econômicos atribuídos à soldagem MIG possam ser mais plenamente explorados, mas o sucesso na aplicação desse processo ainda depende da seleção do modo de operação apropriado, do equipamento mais adequado e de treinamento do soldador.

A possibilidade de fazer alterações rápidas e controladas nas condições de soldagem pode ser usada não apenas para controlar a transferência de metal na soldagem MIG-P, mas para atuar em diferentes outros aspectos do processo de soldagem. Um exemplo é o uso de pulsação dupla da corrente. Neste caso, a pulsação de maior frequência é usada para controlar a transferência de metal enquanto que a de menor frequência é usada para controlar a poça de fusão de forma similar à usada na soldagem GTAW (MODENESI, 2005). A Figura 6 ilustra tal metodologia.

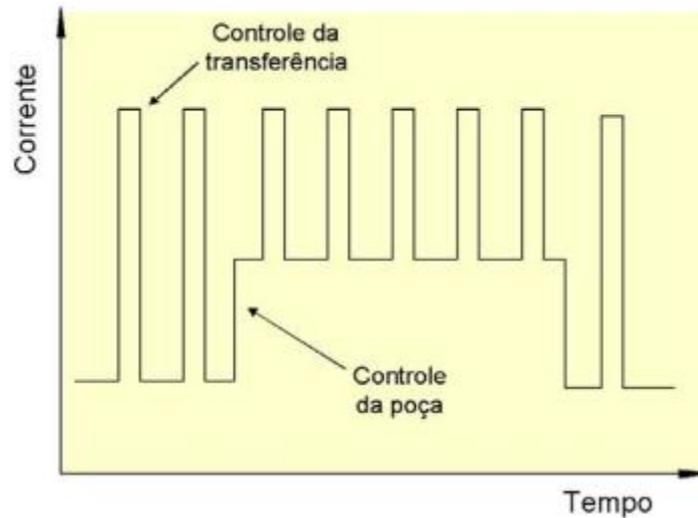


Figura 6. Variação da corrente na soldagem MIG-P com pulsação dupla (MODENESI, 2005)

2.4 MIG PULSADO MODO ADAPTATIVO

Descrito anteriormente, a soldagem em ligas de alumínio demanda cuidados específicos inerentes a esse metal, principalmente no que diz respeito a camada de óxido existente na superfície do metal.

Como a tensão de arco é proporcional ao comprimento do arco, para uma dada condição, e como o comprimento do arco é difícil de medir, muitas vezes se faz referência à tensão para aludir ao comprimento do arco. Dessa forma, torna-se muito importante durante a soldagem, a manutenção dos valores da corrente e do comprimento do arco (indiretamente a tensão) o mais estável possível (SCOTTI, 2008).

No entanto, durante a soldagem com MIG-P em alumínio quando imposta a corrente, observa-se uma variação do arco indesejável. Assim, a utilização de mecanismos de controle do arco podem minimizar ou até finalizar com este problema. O modo adaptativo visa contornar essa variação do comprimento do arco a partir de uma tensão de referência estabelecida pela fonte de energia, atuando em primeira instância na corrente eficaz, aumentando ou diminuindo, para o controle o arco. Caso essa variação de corrente atinja o mínimo possível

para se manter o arco, os valores do tempo de base poderão ser modificados para a manutenção do arco.

2.5 METODOLOGIA PARA CÁLCULO DA PRODUTIVIDADE

Existem vários parâmetros que pode ser estudados para avaliar a produtividade na soldagem. Como exemplo disto, pode-se citar a velocidade de soldagem, velocidade de arame e a taxa de deposição de material.

A taxa de deposição (Z_m), isto é, a massa de metal de adição depositada na solda por unidade de tempo, está relacionada com a taxa de alimentação através da Equação 1:

$$Z_m = \varphi W_m \quad (1)$$

Onde φ é a eficiência de deposição W_m é a taxa de fusão.

A eficiência de deposição (φ) é inferior ou igual a um quando a única fonte de metal de adição é o arame maciço. A Tabela 2 apresenta os valores de φ para os processos de soldagem a arco. Já a taxa de fusão (W_m) pode ser expressa a partir da Equação 2.

Tabela 2. Valores de φ para diferentes processos de soldagem (MODENESI, 2001)

Processo	φ (%)
Eletrodos Revestidos: 350 mm	55-65
	60-70
450 mm	60-70
SAW	88-99
ESW	95-100
GMAW	65-85

$$Wm = \left(\frac{\pi d^2}{4}\right)\rho W \quad (2)$$

Onde ρ é a densidade do arame e W é a velocidade de fusão que pode ser representada pela velocidade de arame.

Diferentes técnicas podem ser usadas para aumentar a taxa de deposição. Na soldagem SAW, pode-se adicionar pó metálico à junta, o qual é fundido e incorporado à solda. Na soldagem GTAW mecanizada, é possível pré-aquecer o arame de adição pela passagem de uma corrente elétrica através do mesmo (soldagem com “arame quente”). A Figura 7 ilustra os intervalos típicos da taxa de deposição de cada processo de soldagem.

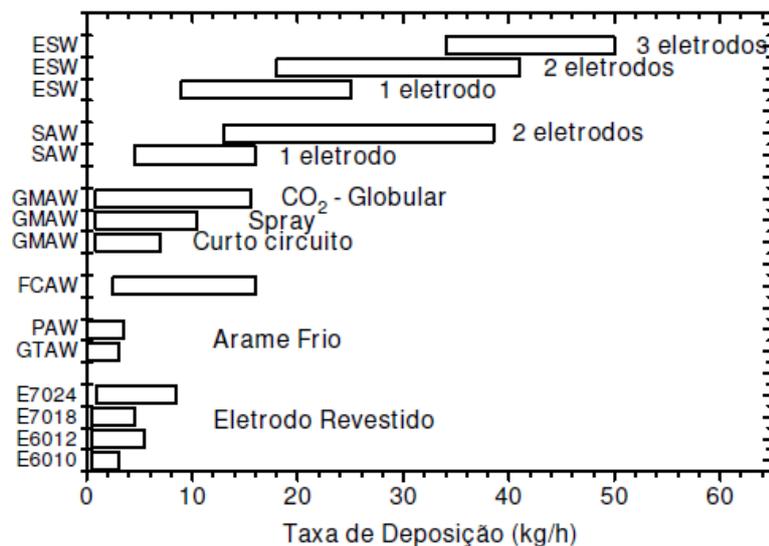


Figura 7. Intervalos típicos da taxa de deposição de cada processo de soldagem (CARY, 1994)

Capítulo 3***Materiais e métodos***

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 ARAMES

Foram utilizados neste trabalho dois tipos de arames, ER5183 e ER5087 ambos com o diâmetro de 1,2 mm, dentre os quais será determinado no decorrer dos experimentos qual apresenta melhores resultados relacionados à qualidade da solda.

O primeiro, largamente utilizado no setor naval, é próprio para soldagem das ligas de alumínio, especialmente em aplicações que exigem resistência a corrosão marítima, porém não deve ser empregado a trabalhos acima de 65°C. Pode ser aplicado na construção naval, equipamentos criogênicos e indústrias automobilística (WELD-INOX, 2013).

Já o consumível ER5087 tem em sua composição química a presença de zircônio que produz uma zona fundida com grãos finos, reduzindo assim a tendência de surgimento de trincas por solidificação (MIG-WELD, 2013). A Tabela 3 apresenta os valores da composição química dos dois arames.

Tabela 3. Composição química dos consumíveis ER5183 e ER5087 (MIG-WELD, 2013)

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Be	Zr	Al
ER5183	0,40	0,40	0,10	0,50 - 1,0	4,3 - 5,2	0,05 - 0,25	0,25	0,15	-	-	R E S
ER5087	0,25	0,40	0,05	0,70	4,5 - 5,2	0,05	0,25	0,15	0,0003	4,50 - 5,20	T A N T E

3.2 GÁS DE PROTEÇÃO

Dentre os gases inertes de proteção utilizados em ligas de alumínio, destacam-se o hélio (He) e o argônio (Ar), havendo a possibilidade de se trabalhar com misturas de ambos. No entanto, o primeiro, apesar de possuir boas propriedades, invariavelmente possui um valor agregado muito alto. Pensando nisto, optou-se por utilizar o argônio comercialmente puro para realização deste estudo.

Para os experimentos, a vazão do gás foi determinada em 15 L/min, havendo o controle do fluxo através de um fluxímetro alocado na tocha de soldagem, evitando possíveis perdas de gás no trajeto do cilindro até a mesma.

3.3 CORPOS DE PROVA

Para a confecção dos corpos de prova, foi escolhida a liga de alumínio naval AA5083. Esta liga dispõe de uma excelente usinabilidade e estabilidade, com uma dureza entre 75 e 95HB, variável conforme espessura (COPPERMETAL, 2013).

O alumínio AA5083 contém de 0,40 a 1,00% de manganês e de 0,05 a 0,25% de cromo (Tabela 4), apresentando as melhores características das ligas de alumínio semiacabados da série 5000. Garante uma boa soldabilidade, além disso, uma alta resistência, sobretudo na atmosfera marinha, sendo principalmente utilizado no segmento naval (COPPERMETAL, 2013).

Tabela 4. Composição química da liga de alumínio AA5083 (COPPERMETAL, 2013)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Outros	Al
0,40	0,40	0,10	0,40	4,0	0,05	0,25	0,15	0,05	Restante
			– 1,0	– 4,9	– 0,25				

Para evitar uma possível diferenciação de condições iniciais de calor entre os ensaios, todos os corpos de prova apresentaram as mesmas dimensões. Estes foram confeccionados com as dimensões de 400 mm X 200 mm com duas espessuras, 8 e 12 mm, dispostos em uma junta de topo com chanfro em V de 80° e a abertura de raiz (Gap) de 3 mm, ambos ilustrados na Figura 8.

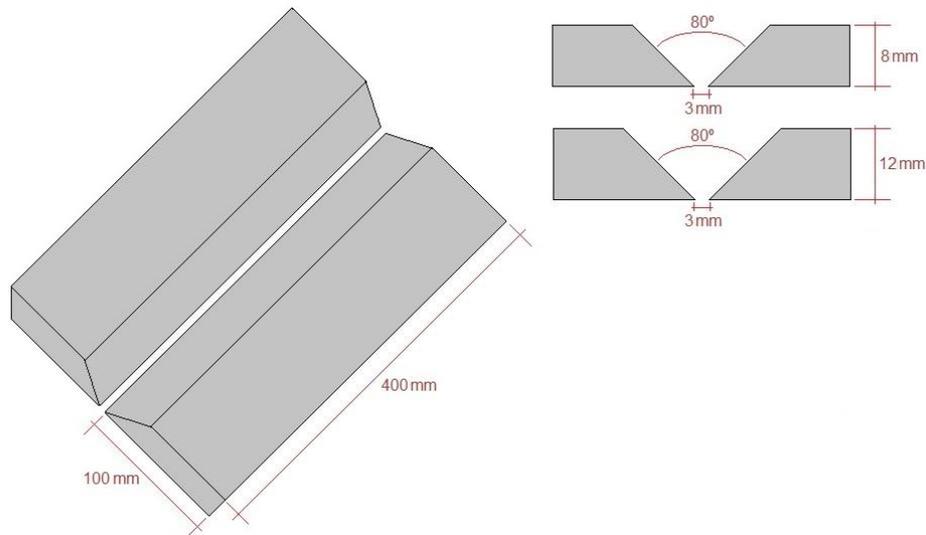


Figura 8. Dimensões dos corpos de prova

3.3.1 Passe de raiz

Para realização dos passes de raiz nos corpos de prova, foi escolhida a fonte de soldagem da Fronios com o processo Cold Metal Transfer (CMT).

Em seu trabalho, MARQUES (2013) evidencia que o CMT se mostrou capaz de realizar uma solda de raiz, produzindo cordões com bons acabamentos tanto na face como na raiz da solda. A Tabela 5 mostra os parâmetros utilizados para realização dos passes de raiz nas espessuras de 8 e 12 mm.

Tabela 5. Parâmetros utilizados para realização dos passes de raiz nos corpos de prova

Espessura (mm)	8	12
Velocidade de alimentação (m/min)	6,2	7,4
Velocidade de soldagem (cm/min)	36	37
Intensidade de corrente (A)	139	160
Tensão (V)	17,8	18,4
Tecimento	Triangular	
Tempo de parada (s) no tecimento	0	
Amplitude (mm) no tecimento	5	
Frequência (Hz) no tecimento	4	
DBCP (mm)	15	
Ângulo de ataque da tocha	5° (Empurrando)	

Para que durante o passe de raiz o gap não variasse devido à alta taxa de deformação térmica que o alumínio exerce, foram realizados pontos de solda nas extremidades de cada corpo de prova, conforme ilustrado na Figura 9.



Figura 9. Ponto de solda em uma das extremidades dos corpos de prova

3.4 PASSE DE ENCHIMENTO

Com a premissa de comparar duas técnicas com diferentes arames, tanto a corrente eficaz, quanto a taxa de deposição média, assumem valores variados, o que dificulta as comparações (cordões com volumes e energias impostas distintas). Desta forma, para avaliar sistematicamente o efeito das técnicas com os arames, optou-se por manter o mesmo volume de cordão de solda em todos os experimentos, o que pôde ser conseguido mantendo-se a relação da velocidade de alimentação (V_a) pela velocidade de soldagem (V_s) igual a uma constante (K) definida neste trabalho para cada espessura e passe de enchimento apresentado na Tabela 6.

Tabela 6. Valores de K para cada espessura

Espessura (mm)	8	12	
K	60	1º passe	35
		2º passe	57

3.4.1 Passe de enchimento nos corpos de prova com 8 mm de espessura

Os corpos de prova foram submetidos à posição vertical ascendente. Para esta espessura, foi realizado apenas um passe de enchimento para cada corpo de prova. As Tabela 7 apresenta os parâmetros utilizados para o passe de enchimento dos corpos de prova nas duas versões de soldagem.

Tabela 7. Parâmetros utilizados para o passe de enchimento dos corpos de prova de 8 mm

Versão	MIG-P CA	MIG-P CC+
Velocidade de soldagem (cm/min)	14	11
Intensidade de corrente (A)	100	130
EN (%)	40	-
a (V)	18	19,4
Tempo de parada (s)	0,2	
Amplitude (mm)	12	
Frequência (Hz)	0,7	
Tecimento	Triangular	
DBCP (mm)	15	
Ângulo de ataque da tocha	5° (Empurrando)	

3.4.2 Passe de enchimento nos corpos de prova com 12 mm de espessura

Para manter o mesmo critério de avaliação, os corpos de prova com 12 mm de espessura também foram submetidos a posição vertical ascendente. Sabendo que o volume a ser preenchido foi maior para os corpos de prova de 12 mm de espessura, foi necessária a realização de dois passes de enchimento. A Tabela 8 exibe os parâmetros utilizados para os dois passes de enchimento dos corpos de prova nas duas versões de soldagem.

Tabela 8. Parâmetros utilizados para os passes de enchimento dos corpos de prova de 12 mm

Versão	MIG-P CA		MIG-P CC+	
	1º	2º	1º	2º
Passe	1º	2º	1º	2º
Velocidade de soldagem (cm/min)	26,6	16,6	24	15
Intensidade de corrente (A)	160	165	130	135
EN (%)	40		-	
a (V)	20	20	20	20
Tempo de parada (s)	0,15	0,13	0,15	0,13
Amplitude (mm)	7	16	7	16
Frequência (Hz)	1	0,8	1	0,8
EN (%)	40		-	
Tecimento	Triangular			
DBCP (mm)	15			
Ângulo de ataque da tocha	5º (Empurrando)			

3.4.2.1 Passe de enchimento utilizando a versão MIG Convencional

Partindo do princípio que os corpos de prova com 12 mm de espessura serão soldados com uma intensidade de corrente acima da faixa de transição para a versão MIG-P CA, foi contestado o emprego do processo de soldagem MIG Convencional, visto que a soldagem acima da faixa de transição é supostamente inviável.

Desta forma, foi determinada a realização de testes com a versão convencional. Para tal, a mesma metodologia criada no item 3.4 utilizando o volume de cordão de solda como parâmetro de comparação foi proposta para esses ensaios. Assim, a Tabela 9 apresenta os parâmetros empregados para o passe de enchimento com a versão MIG Convencional nos corpos de prova de 12 mm de espessura.

Tabela 9. Parâmetros utilizados para o passe de enchimento com a versão
MIG Convencional

Velocidade de soldagem (cm/min)	24
Ur (V)	27
Va (m/min)	9
Ks	60
Kd	60
Tempo de parada (s)	0,2
Amplitude (mm)	12
Frequência (Hz)	0,7
Tecimento	Triangular
DBCP (mm)	15
Ângulo de ataque da tocha	5° (Empurrando)

3.5 MÉTODOS E EQUIPAMENTOS ADOTADOS PARA AVALIAÇÃO DA SOLDA

Como fase de avaliação preliminar da solda, foi observada a presença ou não de defeitos tais como de mordeduras, trincas de solidificação, falta de fusão e porosidade. Para análise mais detalhada de possíveis descontinuidades nas soldas, o ensaio não destrutivo (END) por raios X.

Para avaliar o modo de transferência metálica de cada técnica de soldagem, além do comportamento térmico presente durante a soldagem, ou seja, a dissipação do calor no material de base, foram utilizadas as câmeras de alta velocidade e térmica.

Para avaliação macrográfica, da zona fundida e zona termicamente afetada, procurou-se avaliar o centro dos corpos de prova, transversal ao cordão de solda. Além disso, sabendo que as duas técnicas de soldagem possui características diferentes durante a soldagem, tais como a forma de onda e aporte térmico, o ensaio de microdureza foi empregado para avaliar possíveis

variações tanto na solda quanto no entorno da mesma. A Figura 10 mostra a secção retirada de cada corpo de prova para visualização posterior microestrutural, além da forma de avaliação da microdureza.

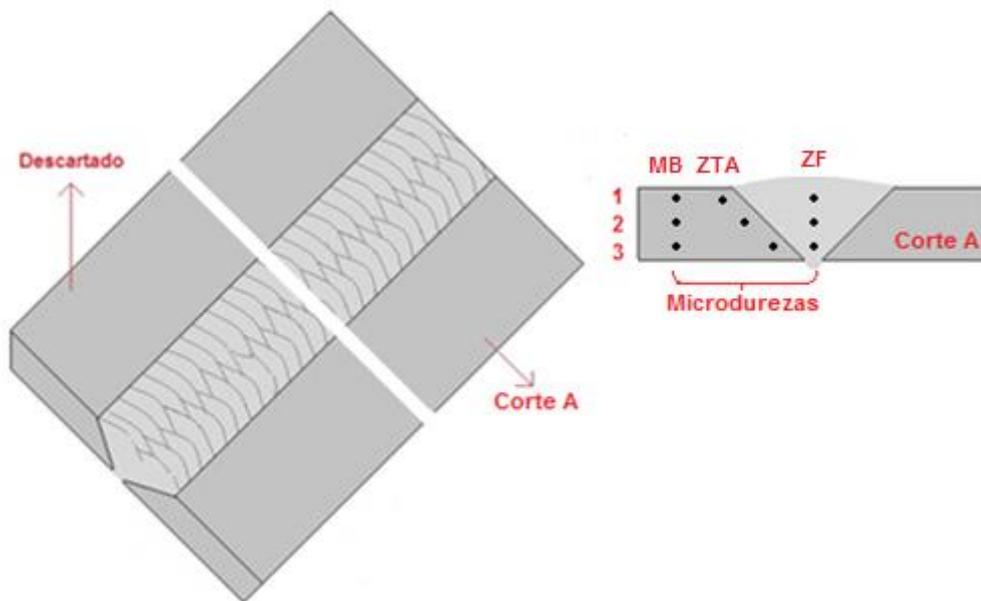


Figura 10. Secção retirada de cada corpo de prova para visualização posterior

Como parte integrante deste trabalho, o cálculo da produtividade a partir da taxa de deposição de material (Z_m) foi utilizada. Esta por sua vez foi determinada a partir das Equações 1 e 2 citadas no capítulo 2.

$$Z_m = \varphi \left(\frac{\pi d^2}{4} \right) \rho V_a \quad (3)$$

Onde:

ρ = Densidade;

V_a = Velocidade de arame

φ = Eficiência de fusão

Como forma de auxiliar a avaliação de cada técnica de soldagem, bem como o tipo de arame utilizado, no que diz respeito ao calor imposto nos corpos de prova durante a solda, foi proposto calcular o aporte térmico a partir da Equação (4).

$$AT = \left(\frac{U \times I}{v_s} \right) \quad (4)$$

Onde:

AT = Aporte térmico (KJ/mm);

U = Tensão (U);

I = Corrente (A)

Va = Velocidade de soldagem (cm/min)

3.6 EQUIPAMENTOS

A fonte de soldagem da IMC DIGIplus A7 foi escolhida para realização do estudo (Figura 11). Esta possui um avançado processador ARM de 32 bits, o que permite operar com várias modalidades de soldagem e elevado desempenho no controle do arco e da transferência metálica (IMC, 2012). A Tabela 10 delinea as principais características técnicas deste equipamento.



Figura 11. Fonte de soldagem (IMC, 2012)

Tabela 10. Características técnicas da fonte de soldagem

Tensão de Alimentação (V)	220, 380, 440, Trifásica
Tensão em vazio (V)	50/68/85
Corrente (A)	Continua ou pulsada
Corrente nominal (A)	280 (100 % de ciclo de trab.)
Potência máx. consumida (kW)	10
Fator de Potência	0,94

Para a aquisição dos valores médios, eficazes e instantâneos da tenção e corrente, além dos valores médios da velocidade de adição de material, foi adicionada a bancada de soldagem o Sistema de Aquisição Portátil (SAP), conforme ilustra a Figura 12.

**Figura 12.** Sistema de Aquisição Portátil IMC (2012)

Com a finalidade de conseguir o maior grau de repetitividade nos ensaios, foi adotado um mecanismo de deslocamento uniforme da tocha (TARTILOPE

V2F), desconsiderando assim qualquer interferência da velocidade de soldagem no decorrer dos experimentos, conforme ilustra a Figura 13.



Figura 13. Mecanismo de deslocamento uniforme da tocha (LABSOLDA, 2013)

Além de submeter a tocha de soldagem a uma velocidade de soldagem constante, este mecanismo possibilita a realização de três diferentes modos de deslocamento da tocha, ou seja, o tecimento no ato da soldagem, retangular, trapezoidal, linha reta e triangular, este escolhido para o presente estudo.

Para a análise da transferência metálica, foi adicionada uma câmera de alta velocidade e o conjunto de LEDs, conforme ilustra a Figura 14.



Figura 14. Câmera de alta velocidade e conjunto de LEDs

Já para análise térmica durante a soldagem, foi usada a câmera da Série SC7000, que segundo o fabricante (FLIR, 2013) foi especificamente projetada

para estudos acadêmicos e de investigação industrial. A Figura 15 ilustra a câmera térmica.



Figura 15. Câmera térmica (FLIR,2013)

As câmeras infravermelhas Série SC7000 são sistemas integrados, que complementam a série SC5000 dedicado a termografia industrial quantitativa e análise de stress. O seu tamanho compacto permite a implementação do SC7000 em pequenos espaços, e a sua interface lente removível confere flexibilidade completa no caminho óptico (FLIR,2013).

Para conseguir todas estas condições experimentais, as soldagens foram realizadas em duas bancadas diferentes. A bancada 1 (Figura 16) foi configurada para o estudo da transferência metálica para os modos adaptativos nas duas versões MIG-P (CC+ e CA).

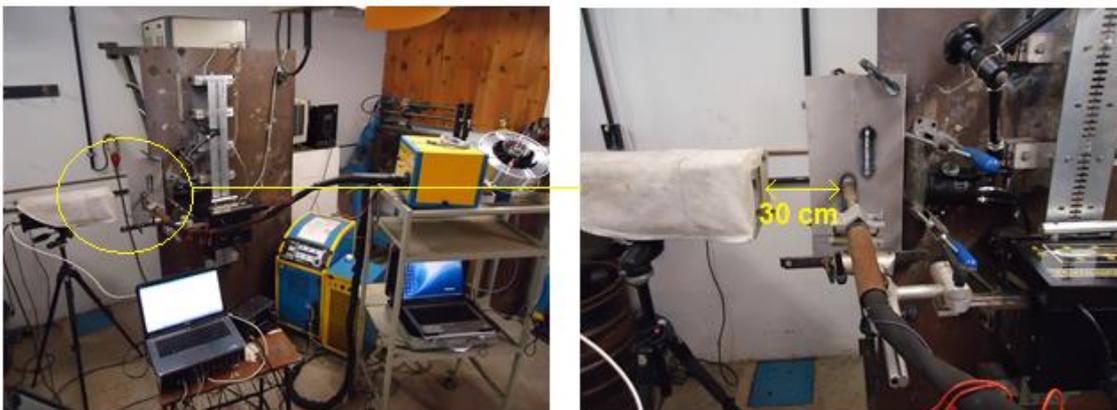


Figura 16. Bancada de soldagem com a câmera de alta velocidade

Já a bancada 2 (Figura 17), foi composta para avaliação do comportamento do aquecimento das peças para cada versão. A diferença entre as duas bancadas é a câmara de alta velocidade que é substituída pela câmera térmica na bancada 2.



Figura 17. Bancada de soldagem com a câmera térmica

Teve-se o cuidado de realizar todas as aquisições em um mesmo trecho do cordão de solda (Parâmetros de solda, as imagens de transferência e térmicas). Estas bancadas, foram totalmente mecanizadas para garantir repetitividade e são compostas pelos seguintes componentes:

- Fonte eletrônica, ajustável, tanto MIG-P CC+ quanto para MIG-P CA ambas no modo adaptativo;
- Sistema de refrigeração;
- Alimentador de arame;
- Sistema de Manipulação de Tocha de dois eixos XY, define os movimentos da tocha de soldagem no tecido;
- Tocha de soldagem do tipo reta refrigerada;
- Sistema de aquisição e processamento de dados, para adquirir os valores médios de velocidade de alimentação (V_a) e eficazes de Corrente (I) e Tensão (U);
- Câmara de alta velocidade para avaliar transferência metálica;
- Câmara térmica para avaliar diferenças térmicas.

Para realização dos ensaios em ambas as bancada, as versões MIG-P CC+ e MIG-P CA foram utilizadas no modo sinérgico adaptativo. A Figura 18 mostra os fluxogramas de cada versão identificados na fonte de soldagem, na qual o Sinérgico PU refere-se a versão MIG-P CC+, enquanto o Sinérgico AC a versão MIG-P CA.

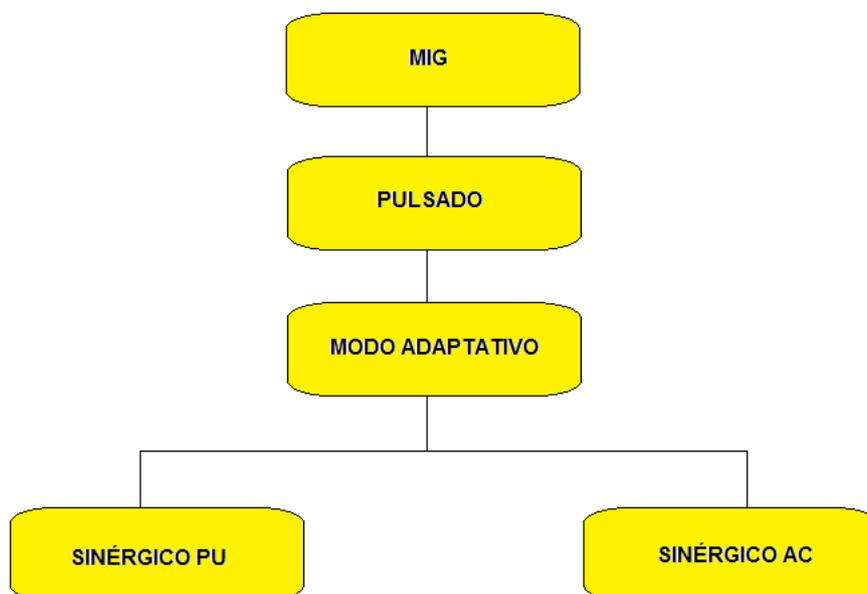


Figura 18. Fluxograma da fonte para as versões escolhidas

Para a realização dos testes com o MIG convencional nos corpos de prova de 12 mm, propostos no item 3.4.2.1, foram escolhidos os mesmos equipamentos utilizados nos passes de enchimento. A Figura 19 evidencia o fluxograma da fonte para a versão MIG Convencional disposto na fonte de soldagem.

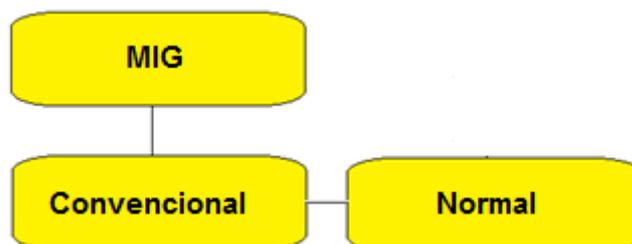


Figura 19. Fluxograma da fonte para a versão MIG Convencional

Capítulo 4***Resultados e discussão***

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 RESULTADOS PRELIMINARES

4.1.1 Corpos de prova

A Figura 20 mostra o passe de raiz realizado nos corpos de prova (8 e 12 mm de espessura) com o CMT. Pode-se notar um passe uniforme com boa aparência independente da espessura a ser soldada assim ilustrado nas Figuras 27 A e B, confirmando que o MIG CMT é uma boa alternativa para realização do passe de raiz em ligas de alumínio AA 5083.

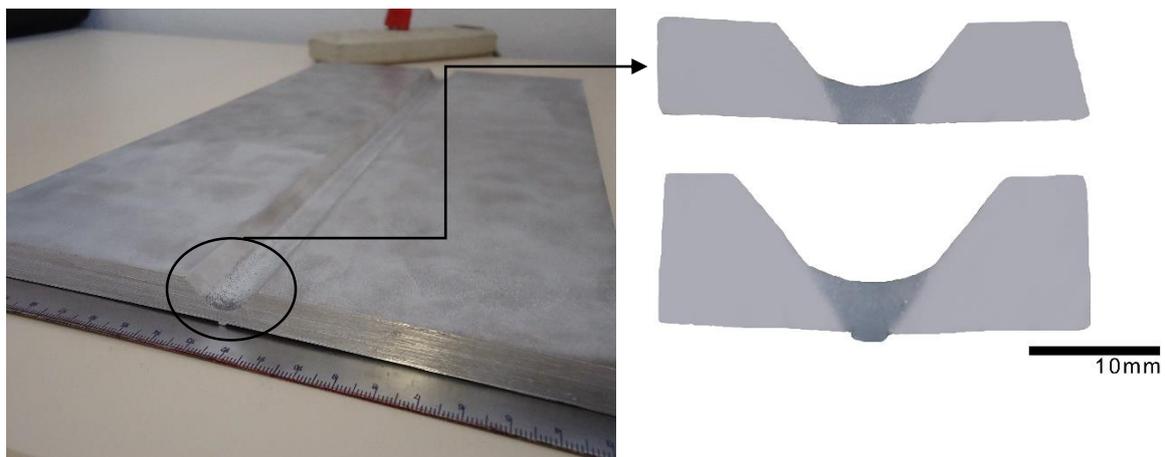


Figura 20. Passe de raiz realizados nos corpos de prova com o MIG CMT (A: 8 mm e B: 12 mm)

Durante os ensaios preliminares, foi constatado que a V_a estabelecida pela fonte de soldagem não condizia com a lida pelo SAP. Foi verificado então que o medidor de velocidade não estava lendo de forma uniforme a V_a , mascarando assim os valores lidos. Para resolução do problema, foi fixado um suporte junto ao sistema de alimentação da fonte de soldagem.

4.2 ANÁLISE DOS ARAMES ER5183 E ER5087

Inicialmente foram avaliados dois tipos de arames, ER5183 e ER5087, a fim de determinar qual dos dois apresenta melhores resultados no que diz respeito a qualidade da solda. Desta forma, ambos foram utilizados na soldagem dos corpos de prova com a espessura de 8 mm tanto para versão MIG-P CA quanto para MIG-P CC+.

As Figuras 21 e 22 ilustram o comportamento das duas técnicas de soldagem com os dois arames utilizados no estudo relacionados a transferência metálica. Pode-se notar o desempenho semelhante para ambos os arames, destacamento de uma gota por pulso, forma da gota esférica e estabilidade do arco, mostrando assim que estes não influenciaram no modo de deposição de material na peça.

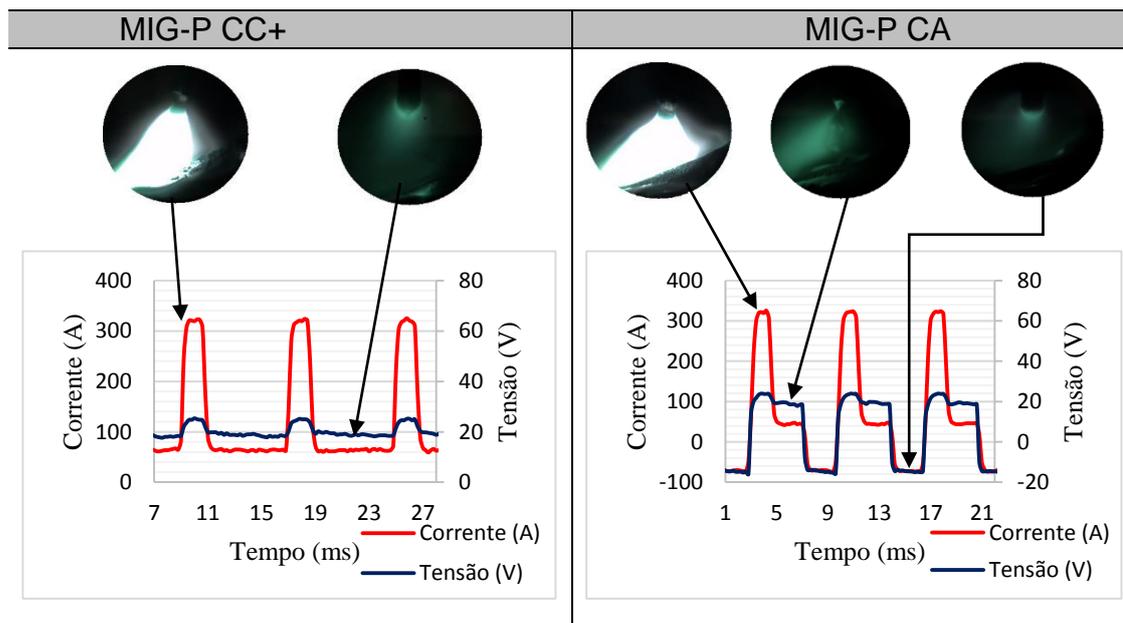


Figura 21. Oscilograma de tensão e corrente durante a transferência metálica com arame ER5183

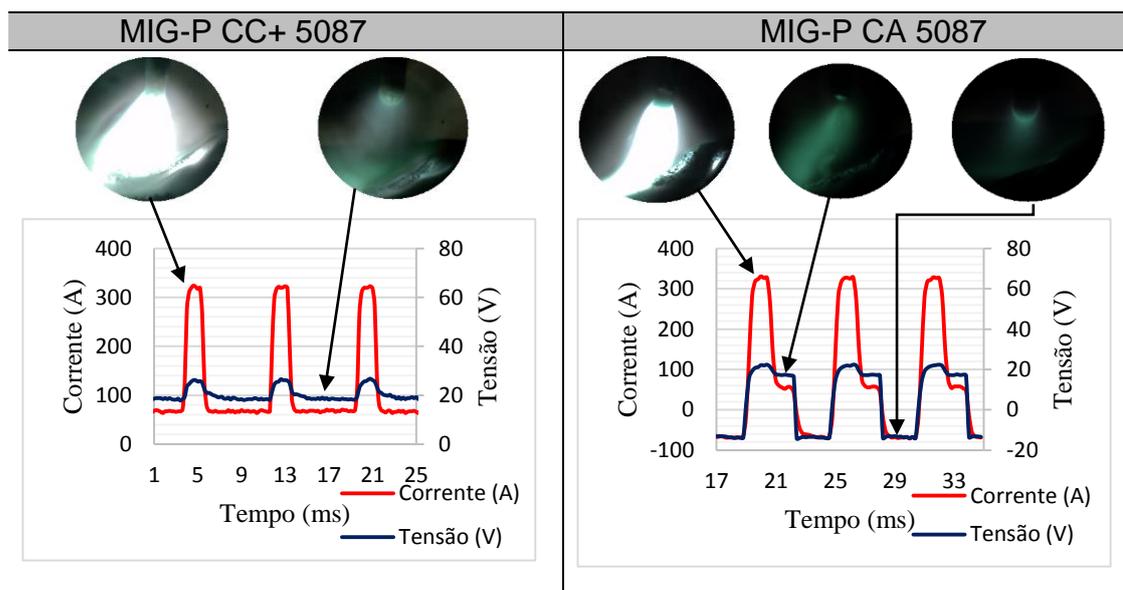


Figura 22. Oscilograma de tensão e corrente durante a transferência metálica com arame ER5087

Com o intuito de se obter o mesmo aporte térmico para ambas as versões de soldagem, os valores eficazes da tensão e corrente, além dos valores médios da velocidade de adição de material, foram registrados para análise. Na Tabela 11 têm-se todos os valores médio da velocidade de arame (V_{am}) e eficazes, corrente (I_{ef}) e tensão (U_{ef}) obtidos pelo SAP para ambos os consumíveis utilizados no estudo.

Tabela 11. Aquisições dos valores eficazes e médios pelo SAP

ER5183			
	U_{ef} (V)	I_{ef} (A)	V_{am} (m/min)
MIG-P CC	19,6	167,0	6,6
MIG-P CA	17,6	153,0	8,1
ER5087			
	U_{ef} (V)	I_{ef} (A)	V_{am} (m/min)
MIG-P CC	19,7	166,0	6,7
MIG-P CA	16,6	154,0	8,2

A Tabela 12 exibe os resultados obtidos a partir da equação da taxa de fusão. Observando os valores nesta Tabela, pode-se verificar que a técnica de MIG-P CA apresenta os maiores valores de W_m , mostrando assim que esta técnica apresenta maior produtividade para soldagem em chapas de 8 mm do que a técnica MIG-P CC+. Além disso, considerando que o volume de material depositado para as técnicas em questão ($K=60$) foram iguais, é válido utilizar a velocidade de soldagem como fator comparativo neste quesito, ou seja, pode-se através da maior velocidade de soldagem registrar que a versão MIG-P CA apresenta maior produtividade.

Tabela 12. Taxa de deposição de material (kg/h)

MIG-P CC+	MIG-P CA
10,45	12,75

As Figuras 23 e 24 ilustram as imagens térmicas das duas técnicas com os arames ER5183 e ER5087, respectivamente. Observa-se que a técnica de soldagem MIG-P CC+ fornece maior quantidade de calor do que a técnica MIG-P CA independente do arame. Esse comportamento pode ser explicado, pois esta é bastante utilizada na soldagem de chapas finas, já que a mesma durante a soldagem impõe uma menor quantidade de energia relacionada a outra técnica, confirmando o que MULINGAN, (2013) cita.

Avaliando a repartição térmica, foi constatado que a técnica MIG-P CC+ concentra o calor nas extremidades dos chanfros, o que pode ser evidenciado com maior facilidade com o arame ER5183 (Figura 23-A). O mesmo comportamento não foi observado na técnica MIG-P CA em ambos os arames.

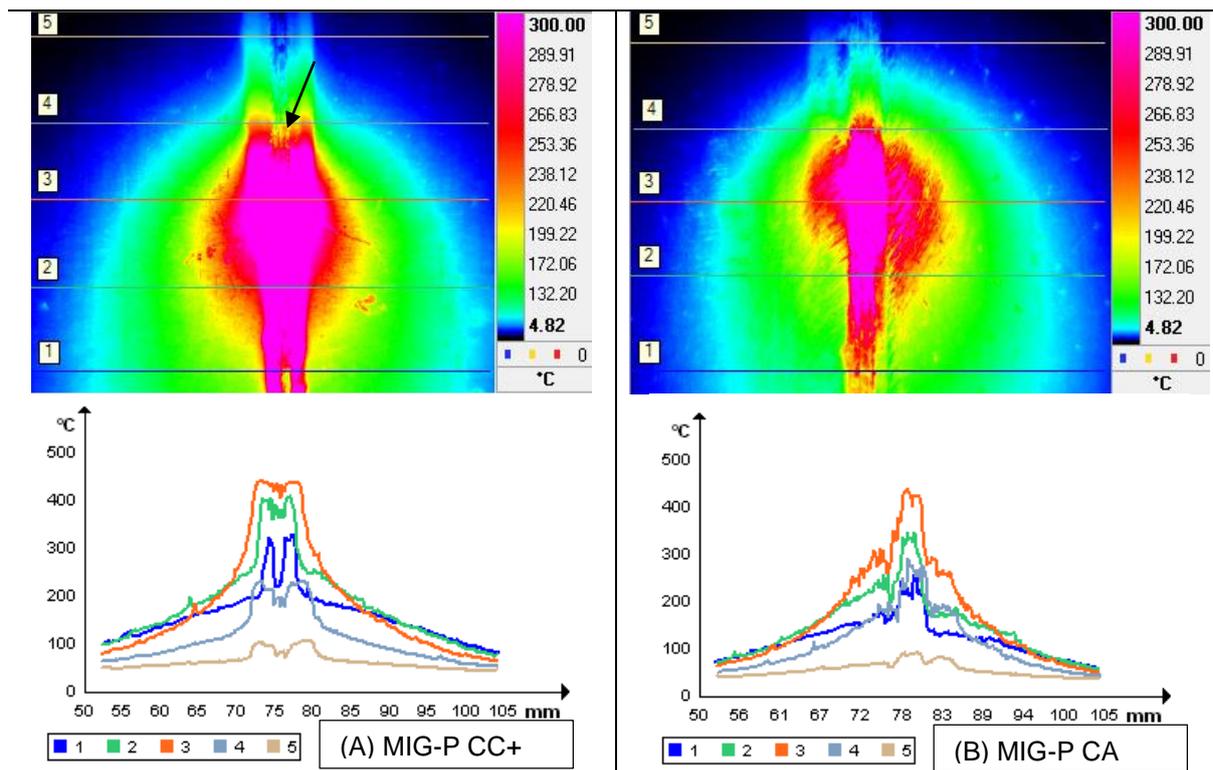


Figura 23. Imagens térmicas e curvas do ciclo térmico das técnicas MIG-P com o arame ER5183

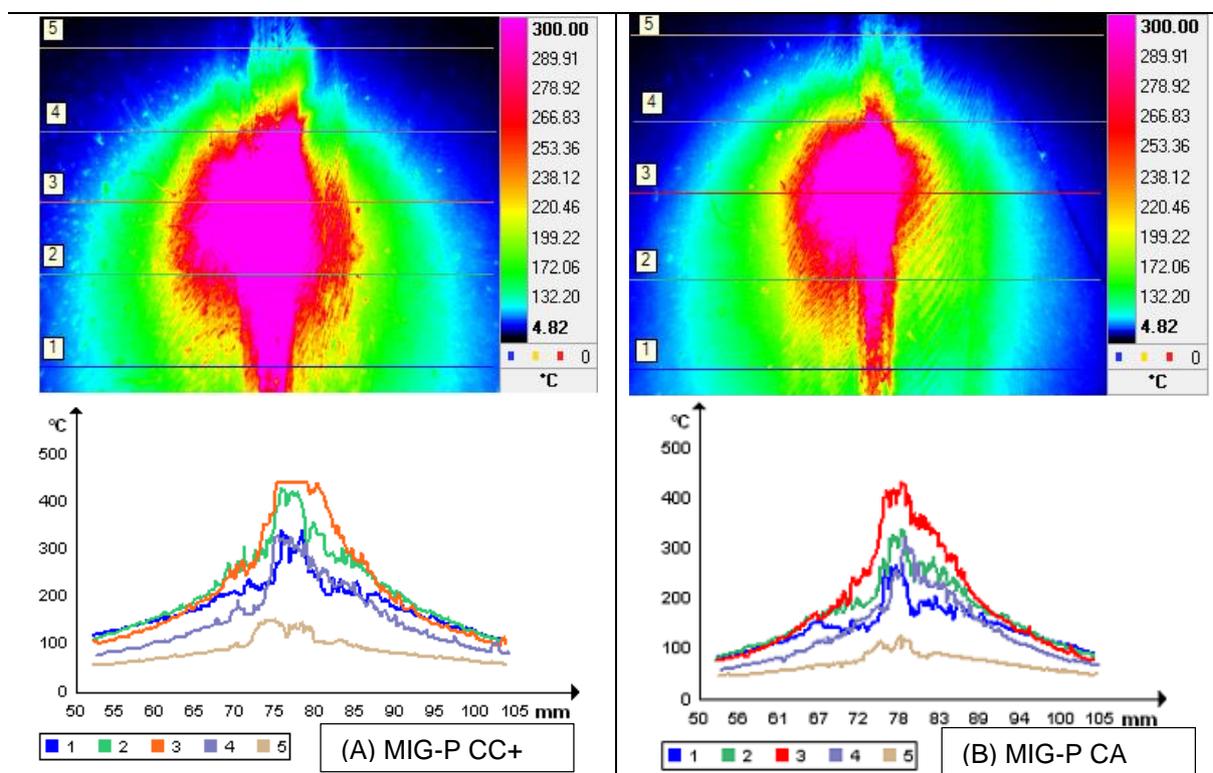


Figura 24. Imagens térmicas e curvas do ciclo térmico das técnicas MIG-P com o arame ER5087

Em um âmbito geral, pode-se associar esta diferença de temperatura entre as duas técnicas ao deslocamento do passe de raiz que foi mencionado anteriormente. Como a técnica MIG-P CC+ impõe maior calor durante a soldagem, isto foi determinante para o deslocamento do passe de raiz.

Outro fator que pode explicar tal fenômeno é o aporte térmico de cada técnica de soldagem. A Tabela 13 apresenta os valores do aporte térmico para cada ensaio. Pode-se notar que a técnica MIG-P CC+ apresenta os maiores valores, confirmando os resultados mostrados nas Figuras 30 e 31. Nota-se ainda que quando comparado os arames, a diferença é mínima, mostrando que o mesmo não alterou de forma significativa o aporte térmico nos ensaios.

Tabela 13. Valores calculados do aporte térmico (kJ/mm) para chapa de 8 mm

	MIG-P CC+	MIG-P CA
ER5087	1,783	1,096
ER5183	1,785	1,154

As Figuras 25 e 26 mostram os cordões de solda realizados com as duas técnicas de soldagem e os dois metais de adição. Visualmente, em ambas as técnicas de soldagem e arames, pode-se detectar cordões de solda contínuos e com boa aparência, sem a presença de respingos de solda. No entanto, quando utilizada a MIG-P CC+, nota-se que o passe de raiz tende a ser empurrado. Isso pode ser justificado, pois esta técnica de soldagem apresenta um maior aporte térmico, resultando no deslocamento do passe de raiz.

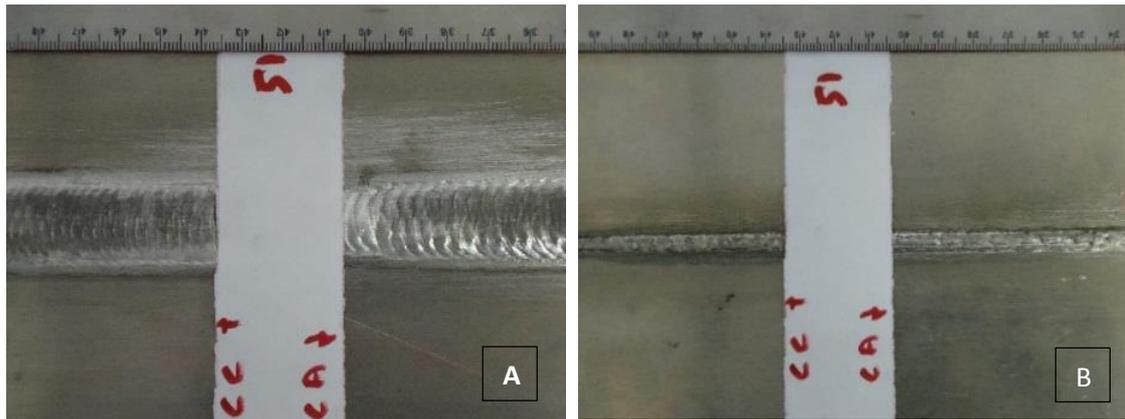


Figura 25. Cordões de solda com o arame ER5183 (A: Face superior - B: Face inferior)

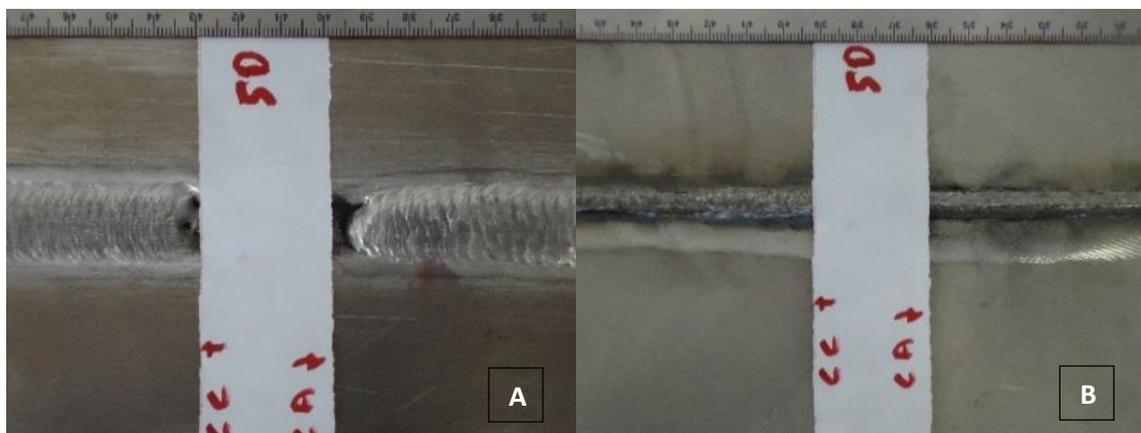


Figura 26. Cordões de solda com o arame ER5087 (A: Face superior - B: Face inferior)

Quando relacionados à macroestrutura, pode-se notar uma área de fusão mais irregular com o arame ER5183 quando utilizado com a técnica MIG-P CA. O mesmo não foi encontrado quando utilizada a técnica MIG-P CC+, obtendo assim áreas fundidas uniformes para ambos os arames. As Figuras 27, 28, 29 e 30 mostram as macrografias das técnicas MIG-P CA e CC+ e os arames ER5183 e ER5087.

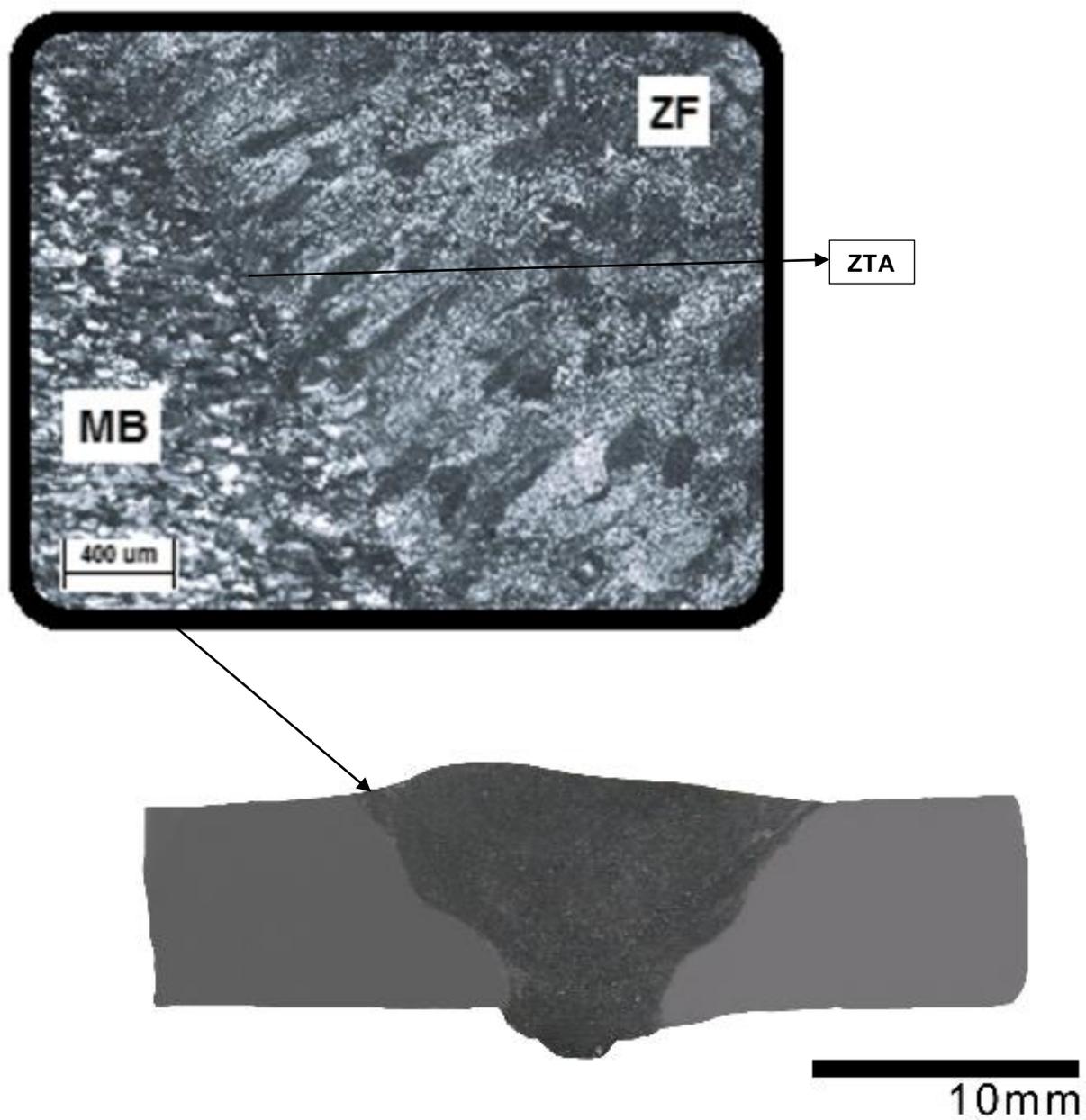


Figura 27. Macrografia com a técnica MIG-P CA utilizando o arame ER5183

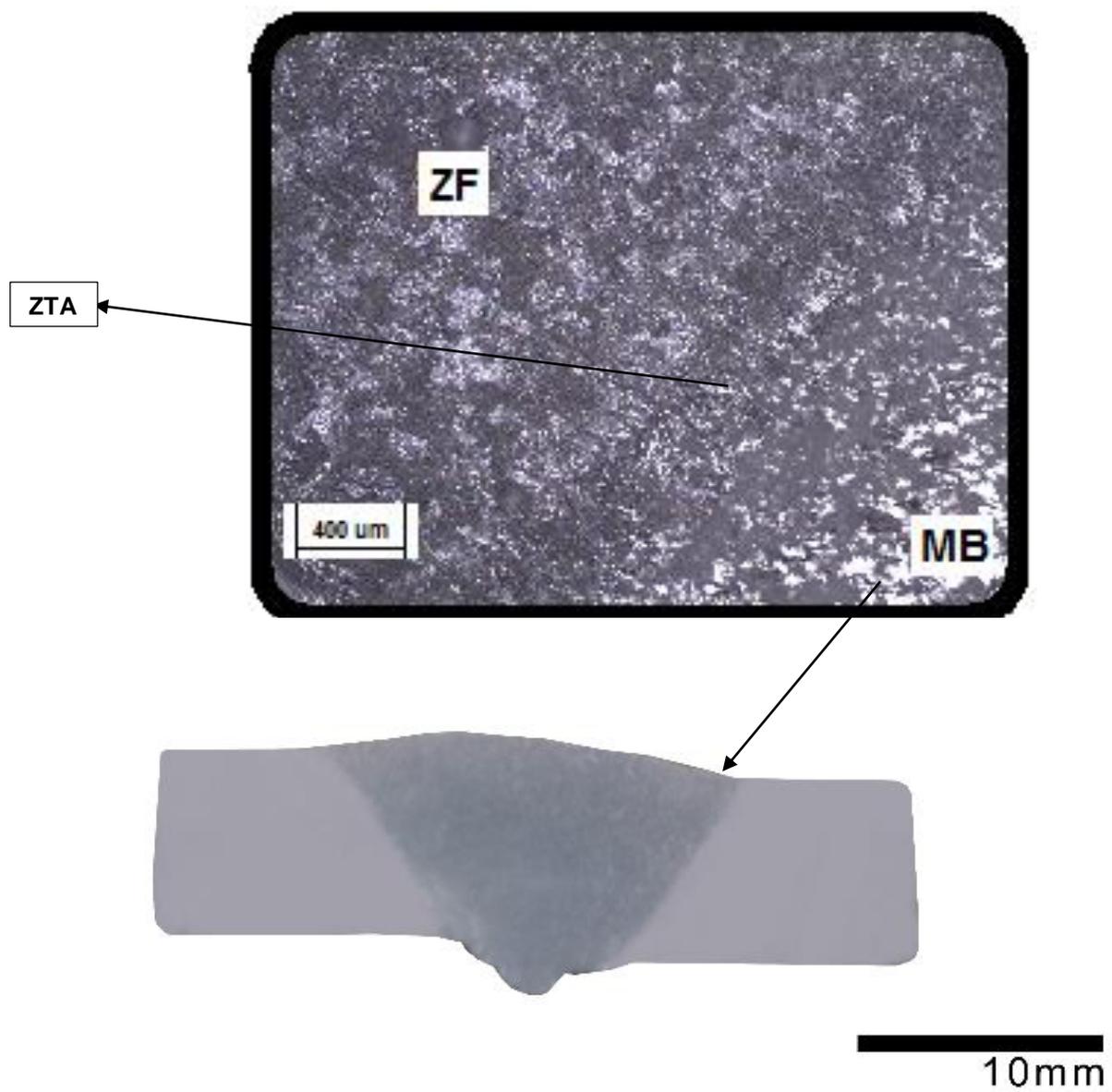


Figura 28. Macrografia com a técnica MIG-P CC+ utilizando o arame ER5183

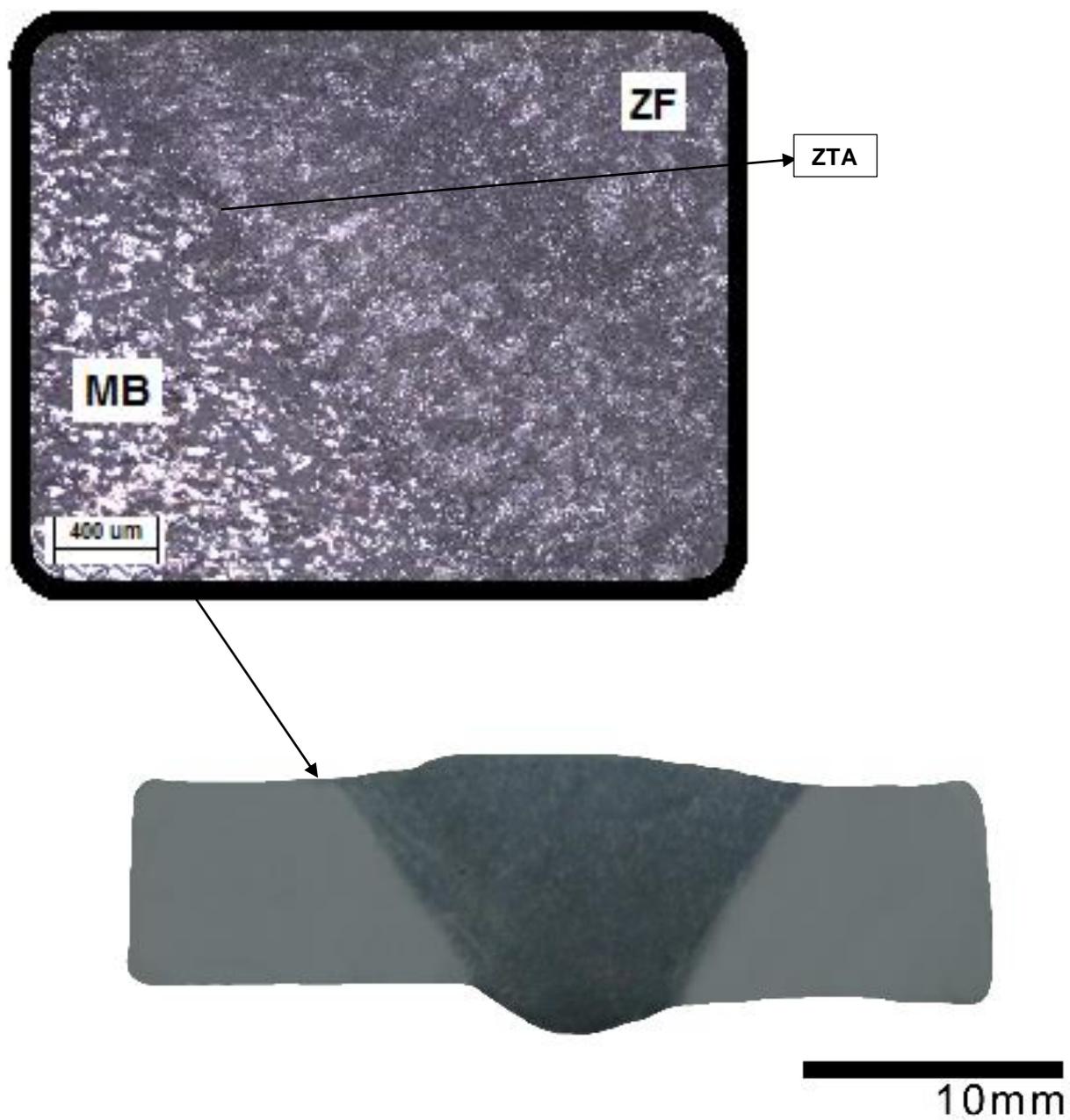


Figura 29. Macrografia com a técnica MIG-P CA utilizando o arame ER5087

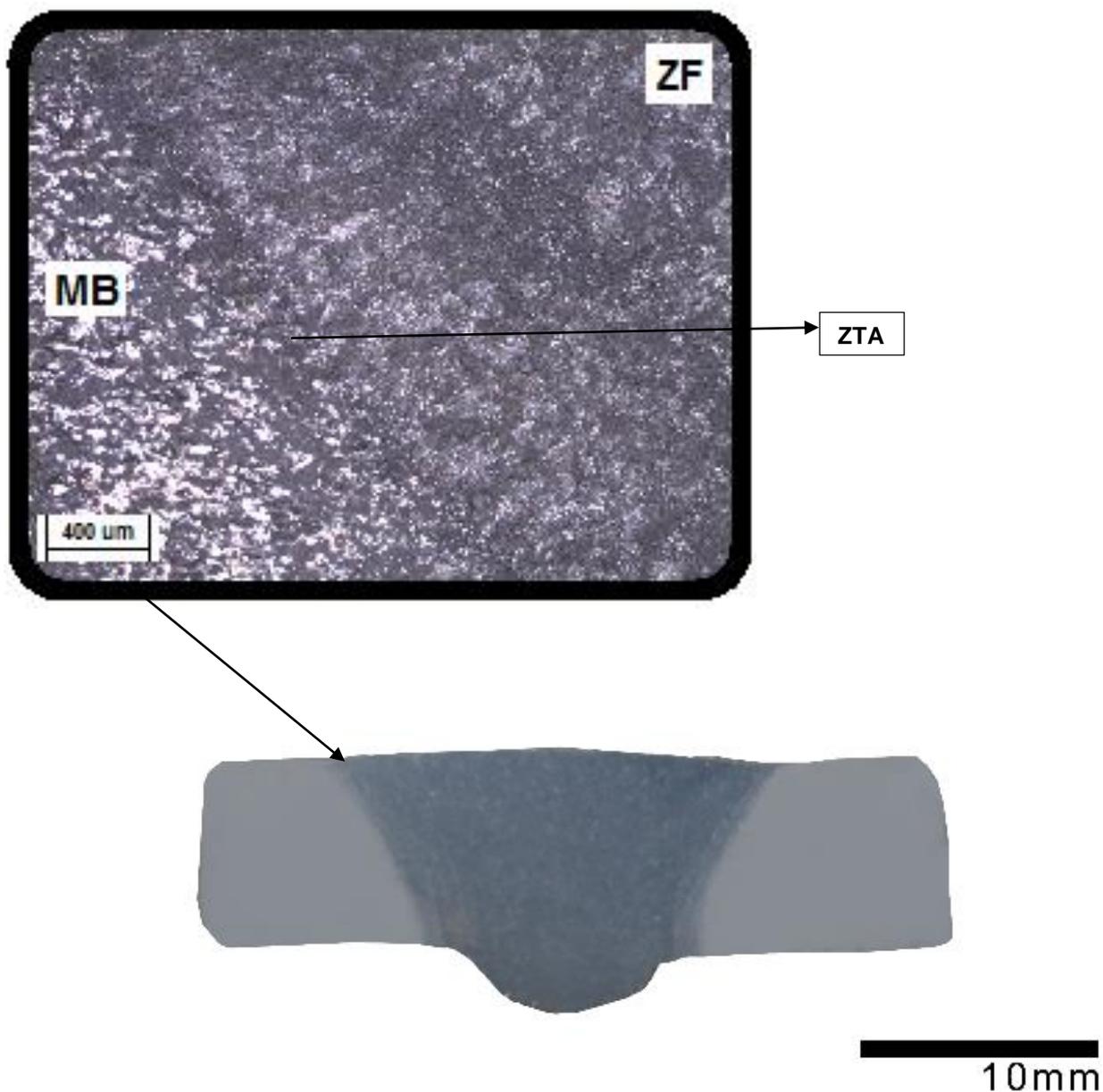


Figura 30. Macrografia com a técnica MIG-P CC+ utilizando o arame ER5087

Quando comparados os valores obtidos pela microdureza, nota-se que a ZF possui menor dureza para ambos os arames. Acredita-se que tal fenômeno pode estar relacionado ao refino de grão causado pelo passe de enchimento. Quando comparado os dois arames a diferença da microdureza detectada é mínima, mostrando que ambos não influenciaram neste comportamento. As Figuras 31, 32, 33 e 34 mostram tais evidências.



Figura 31. Microdurezas com a técnica MIG-P CC+ com o arame ER5087

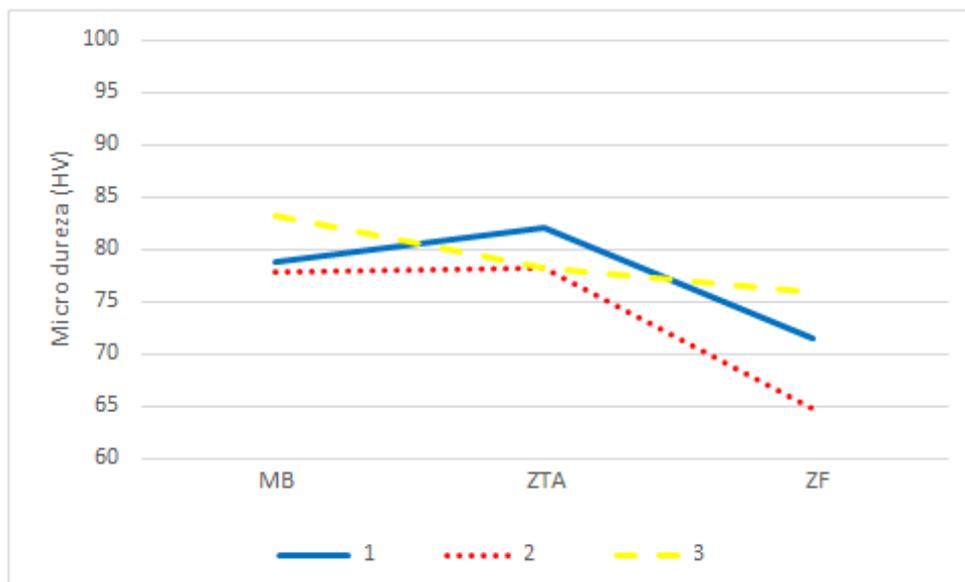


Figura 32. Microdurezas com a técnica MIG-P CC+ com o arame ER5183

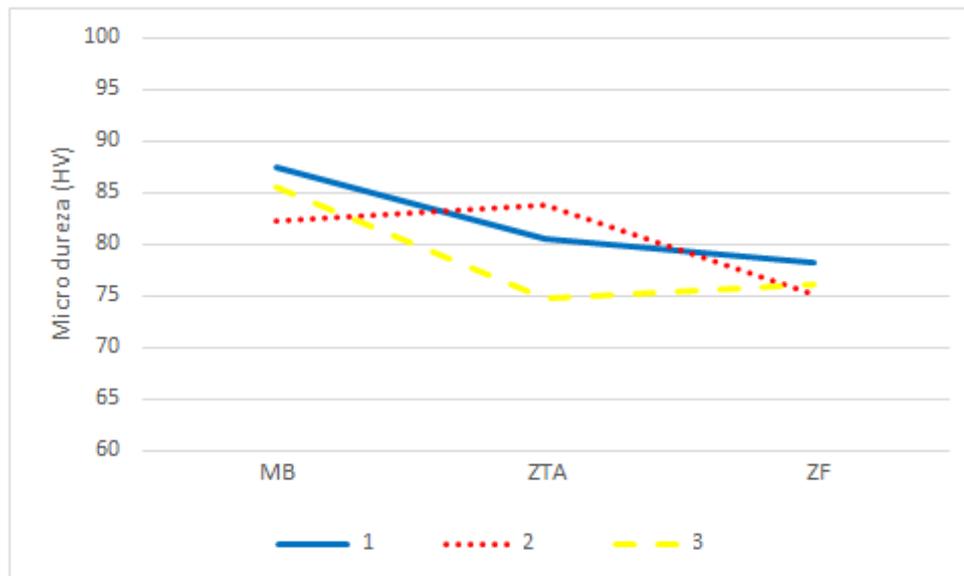


Figura 33. Microdurezas com a técnica MIG-P CA com o arame ER5087

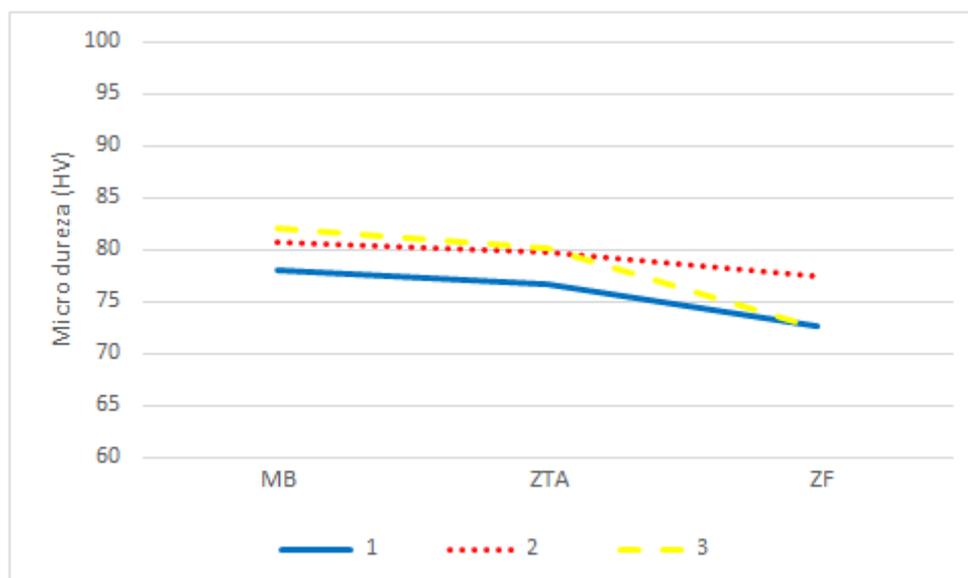


Figura 34. Microdurezas com a técnica MIG-P CA com o arame ER5183

No tocante a radiografia, foi constatado nas soldas com o arame ER5183 com a versão MIG-P CC+ uma pequena concentração de porosidade no cordão de solda (Figura 35). O mesmo não aconteceu quando utilizado a versão MIG-P CA (Figura 36).

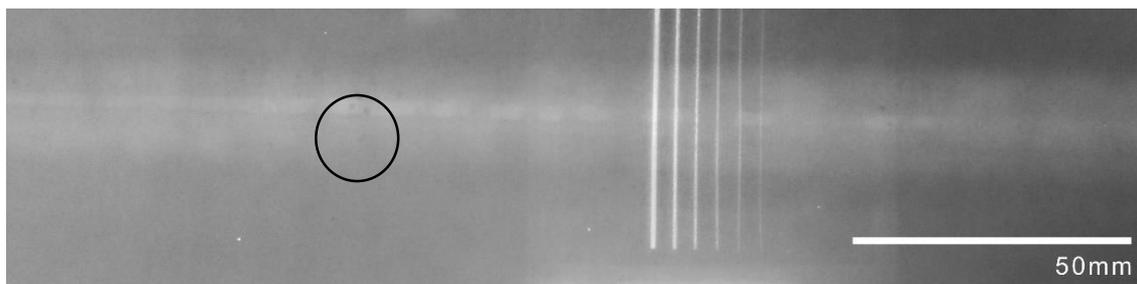


Figura 35. Radiografias dos cordões de solda com o arame ER5183 utilizando a técnica MIG-P CC+

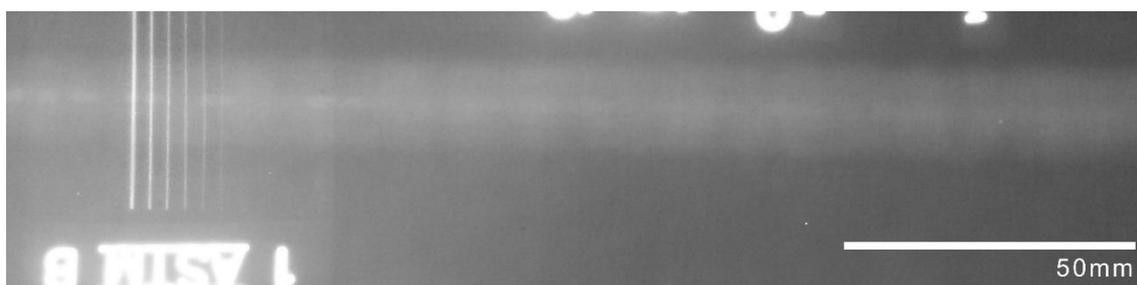


Figura 36. Radiografias dos cordões de solda com o arame ER5183 utilizando a técnica MIG-P CA

No entanto, o teor de porosidade no cordão de solda para ambas as técnicas de soldagem não comprometeu a qualidade da solda. Quando relacionado ao ER5087, os resultados obtidos pela radiografia foram semelhantes a do ER5183, porém, não foi evidenciada porosidade concentrada. Assim como o outro arame, a porcentagem de porosidade não influenciou na qualidade do cordão de solda (Figuras 37 e 38).



Figura 37. Radiografias dos cordões de solda com o arame ER5087 utilizando a técnica MIG-P CC+

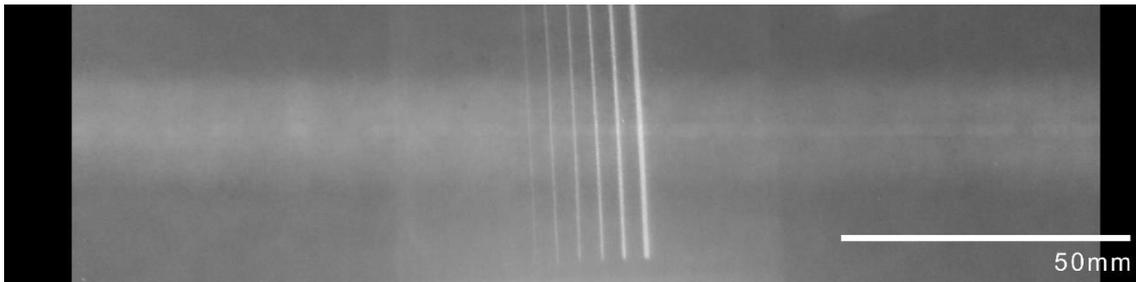


Figura 38. Radiografias dos cordões de solda com o arame ER5087 utilizando a técnica MIG-P CA

4.3 AVALIAÇÃO DO PASSE DE ENCHIMENTO NOS CORPOS DE PROVA COM ESPESSURA DE 12 mm

Para realização das soldagens com ambas as técnicas sobre as chapas de 12 mm de espessura, foi determinado a utilização ao arame ER5087, visto que este apresentou melhores resultados do que o ER5183, destacados na capítulo 4.2.

Foi constatada no experimentos iniciais a formação de porosidades em toda a extensão da solda, conforme ilustra a Figura 39. Acredita-se que a formação deste defeito se deve ao volume de material depositado, maior nestas condições impostas, que por sua vez dificulta a saída dos gases presos na poça de fusão.

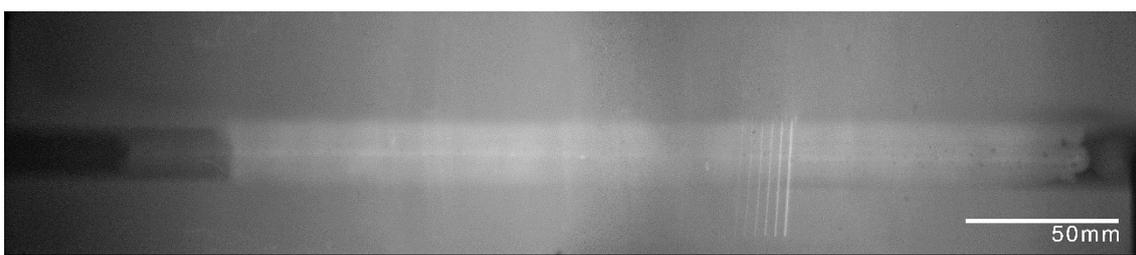


Figura 39. Porosidade

Para tal, foi proposto aumentar os valores de tecimento, resultando em uma maior agitação da poça de fusão, facilitando assim o desprendimento do gás da mesma. Os resultados obtidos a partir deste procedimento foram satisfatórios, diminuindo significativamente a porosidade na solda em ambas as

técnicas de soldagem. A Figura 40 evidencia o ensaio radiográfico realizado no corpo de prova soldado com a técnica MIG-P CA.

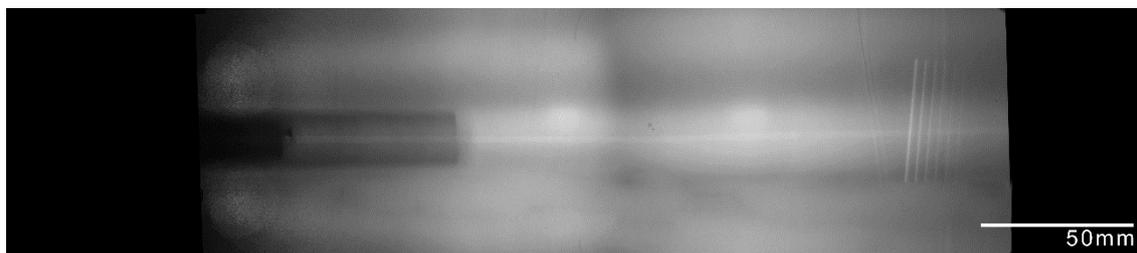


Figura 40. Ensaio radiográfico realizado no corpo de prova soldado com a técnica MIG-P CA

As Figuras 41 e 42 ilustram transferência metálica durante a soldagem em ambas as técnicas, confirmando assim que para as duas foi observado um destacamento de gota por pulso na base nos dois passes de enchimento.

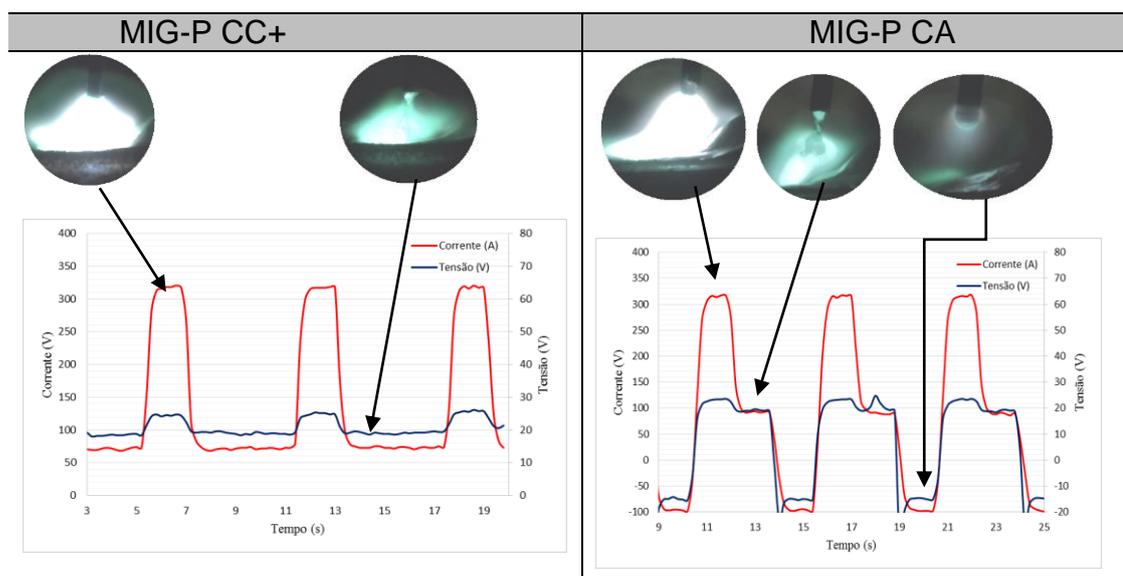


Figura 41. Oscilogramas de tensão e corrente durante a transferência metálica no primeiro passe de enchimento

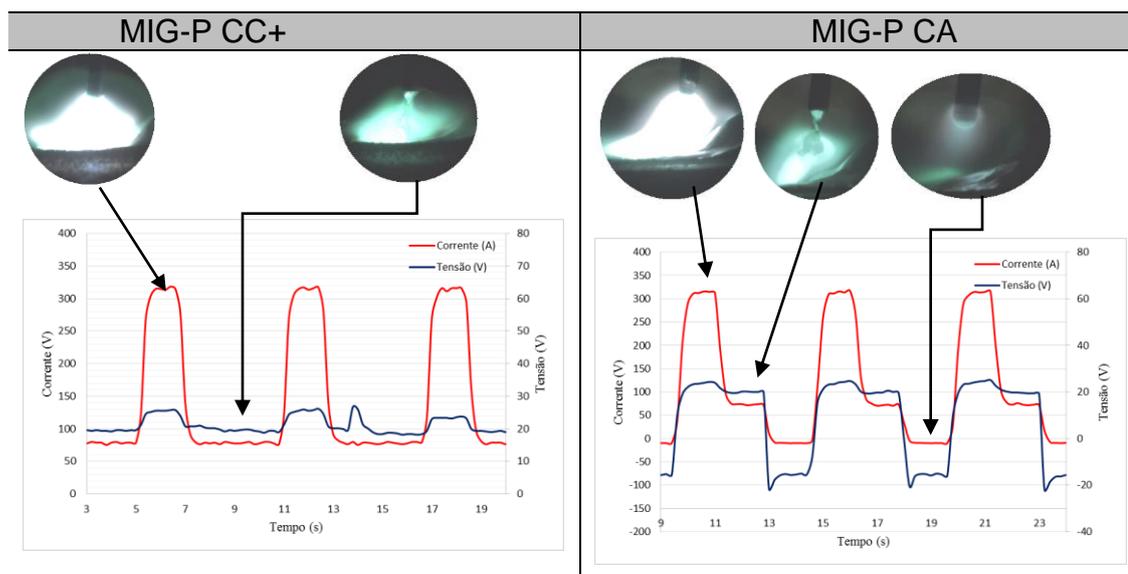


Figura 42. Oscilogramas de tensão e corrente durante a transferência metálica no segundo passe de enchimento

A Tabela 14 mostra todos os valores médios da velocidade de arame (V_{am}) e eficazes, corrente (I_{ef}) e tensão (U_{ef}) obtidos pelo SAP para ambos os passes de enchimento. Pode-se afirmar a partir desses valores que nem a corrente, bem como a tensão exerceram influência nos estudos, visto que os valores obtidos são próximos.

Tabela 14. Aquisições dos valores eficazes e médios pelo SAP pra os passes de enchimento

1º passe			
	U_{ef} (V)	I_{ef} (A)	V_{am} (m/min)
MIG-P CC+	21,2	172,0	8,6
MIG-P CA	19,7	176,0	9,4
2ºpasse			
	U_{ef} (V)	I_{ef} (A)	V_{am} (m/min)
MIG-P CC+	20,7	175,0	8,6
MIG-P CA	19,8	175,0	9,4

A Tabela 15 expõe os resultados obtidos a partir da equação da taxa de fusão para ambos os passes de enchimento. Pode-se verificar também que nestas condições, à técnica MIG-P CA apresentou os maiores valores de W_m comparada a outra técnica, reafirmando que esta fornece maior produtividade mesmo em chapas de espessuras maiores.

Tabela 15. Taxa de deposição de material (Kg/h)

MIG-P CC+	MIG-P CA
13,39	14,64

As Figuras 43 e 44 mostram o comportamento térmico em ambas as técnicas de soldagem para cada passe de enchimento. Nestes parâmetros foi constatado comportamento similar ao apresentado anteriormente, confirmando assim que a técnica MIG-P CA impõe menores valores de temperatura durante a soldagem mesmo em uma espessura maior.

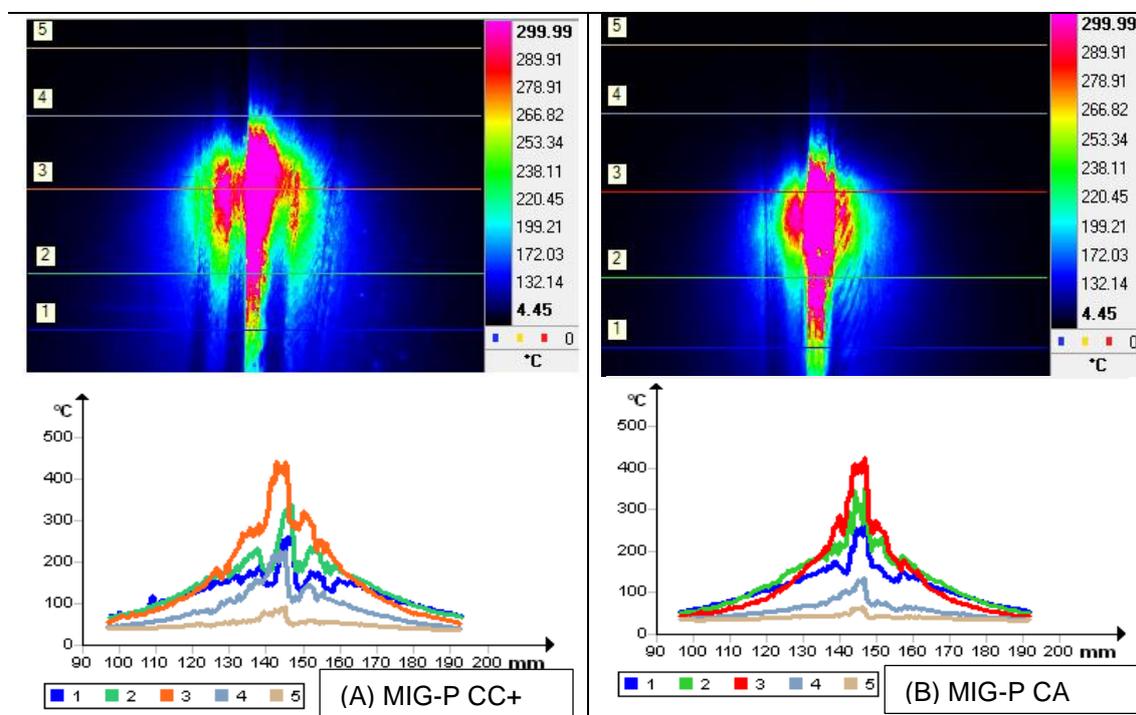


Figura 43. Comportamento térmico no primeiro passe de enchimento

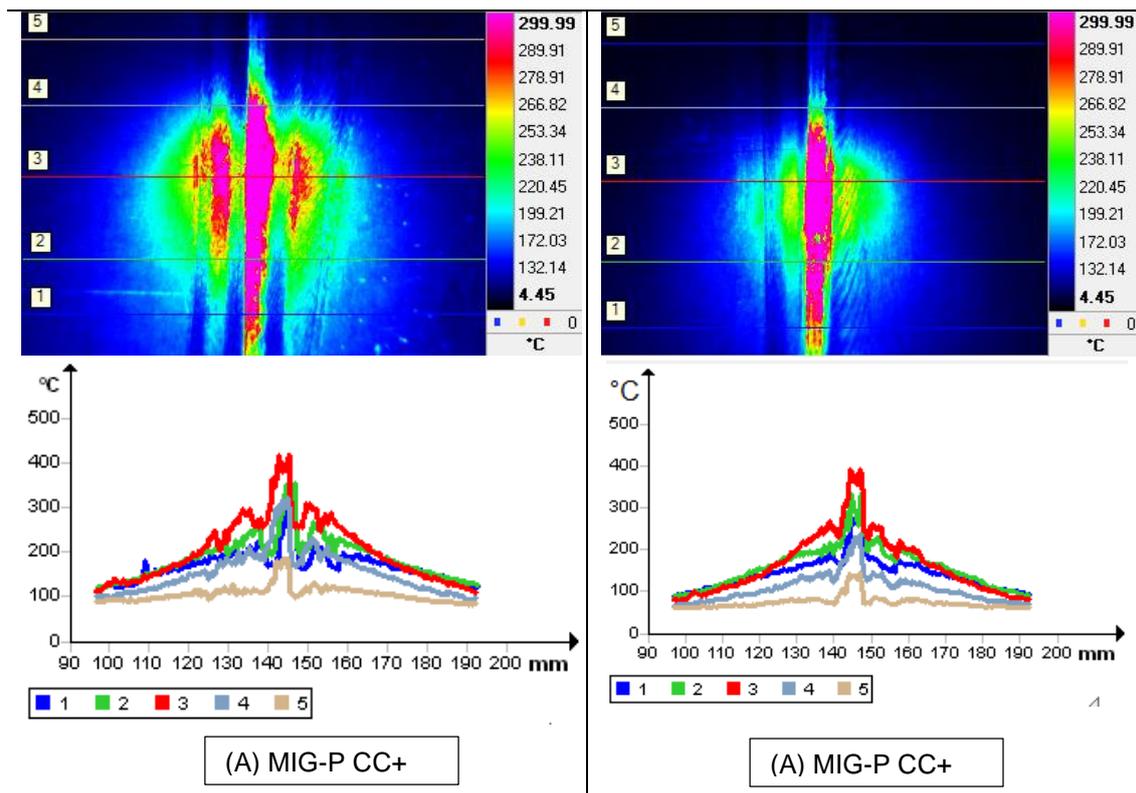


Figura 44. Comportamento térmico no segundo passe de enchimento

Em relação ao aporte térmico aplicado em cada passe de enchimento, a Tabela 16 exibe tais valores. Os resultados obtidos são semelhantes aos ensaios anteriores na chapa de 8 mm, reafirmando que a técnica MIG-P CA impõe menos energia durante a soldagem, resultando em um menor aporte térmico, mesmo quando aumentado a espessura da chapa.

Tabela 16. Valores calculados do aporte térmico (KJ/mm) para chapa de 12 mm

	MIG-P CA	MIG-P CC+
1 ^o passe	0,782	0,912
2 ^o passe	1,252	1,449

Assim como nos ensaios realizados na chapa de 8 mm de espessura, as soldas realizadas na chapa de 12 mm em ambas as técnicas apresentaram

continuidade e sem defeitos visuais, tais como mordeduras e respingos. As Figuras 45 e 46 mostram as soldagens realizadas nos corpos de provas.

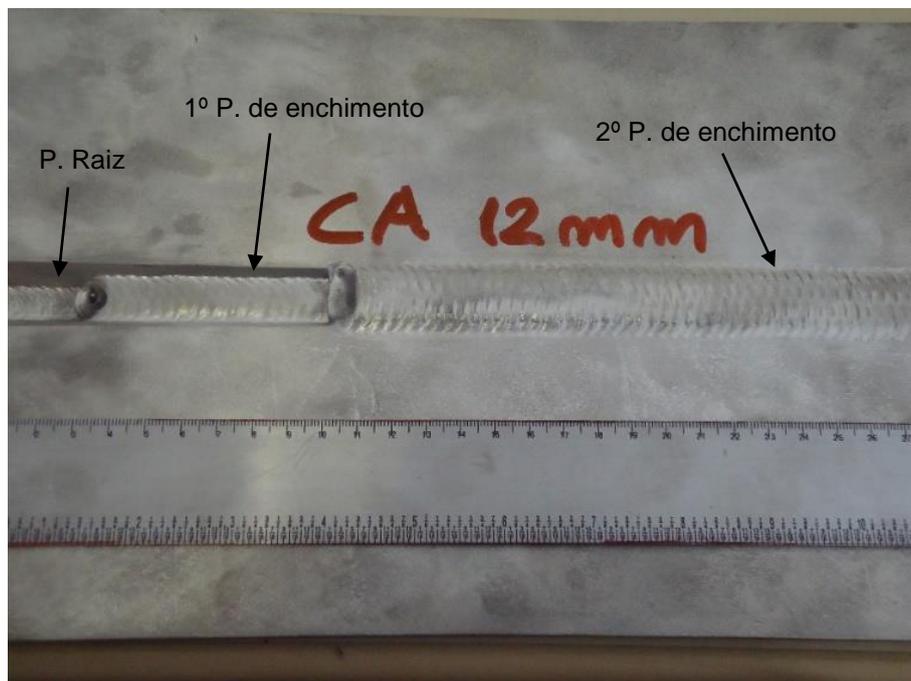


Figura 45. Cordões de solda com a técnica MIG-P CA

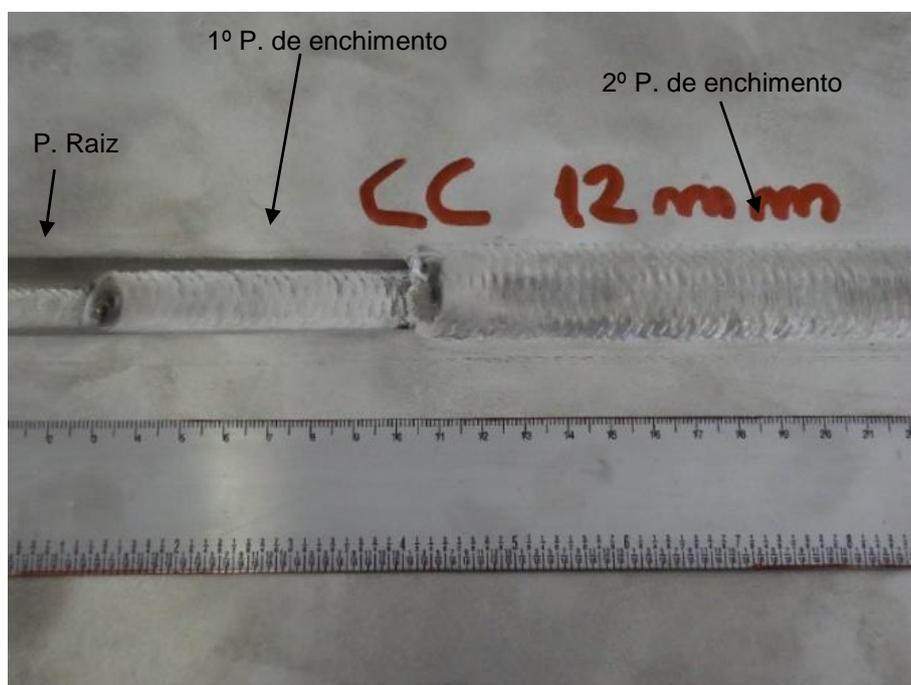


Figura 46. Cordões de solda com a técnica MIG-P CC+

As Figura 47 e 48 mostram as macrografias das técnicas MIG-P CA e CC+ aplicadas na chapa de 12 mm. Ao contrário do que foi percebido nos ensaios anteriores com a chapa de 8 mm, em ambas as técnicas de soldagem pode-se ver uma zona fundida pouco uniforme. Acredita-se que isso pode estar relacionado ao volume de material depositado, maior neste caso, influenciando na geometria da zona fundida. Pode-se notar ainda que quando utilizada a técnica MIG-P CA, foi encontrado uma área de reforço maior do que a outra técnica.

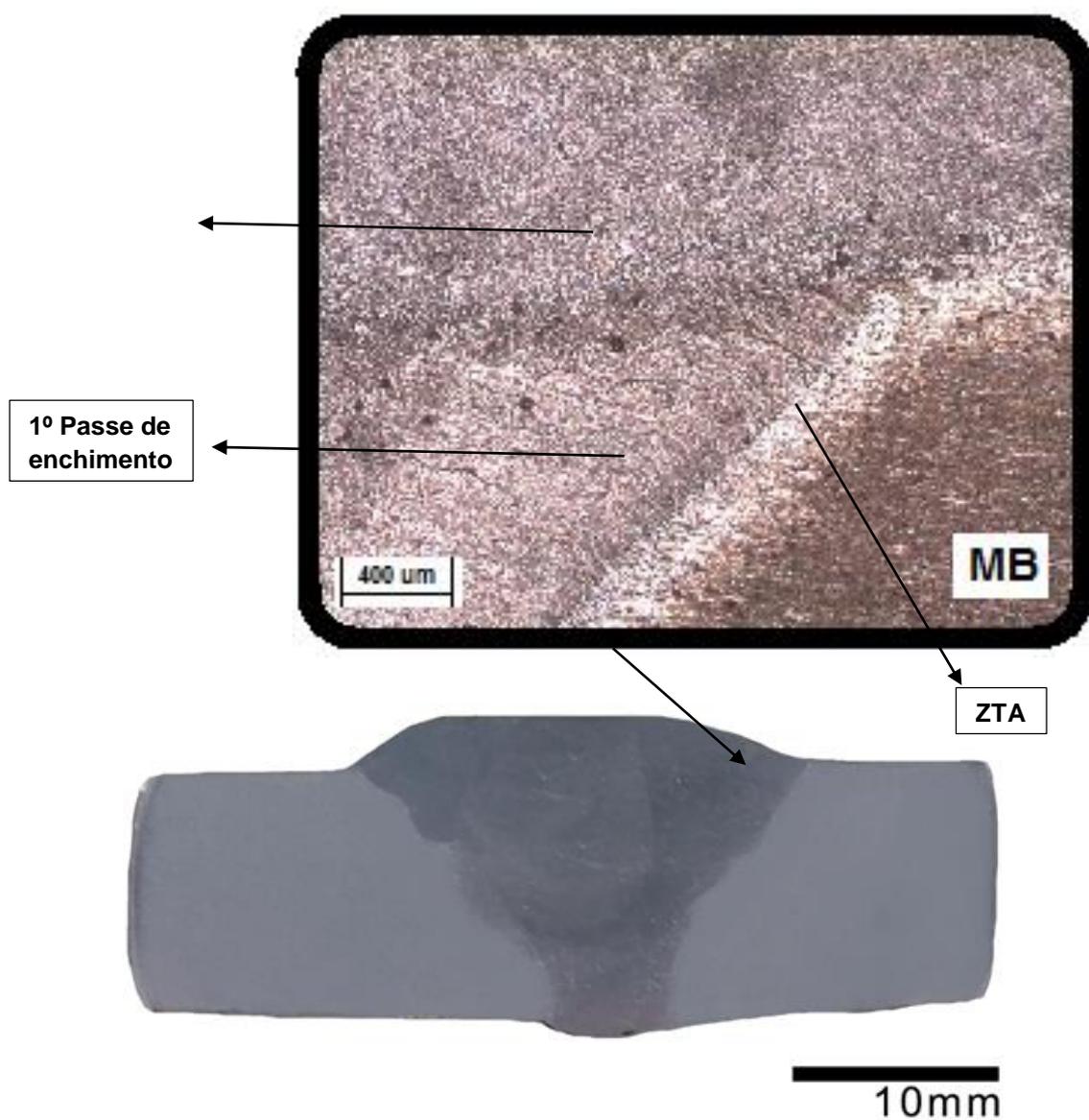


Figura 47. Macrografia com a técnica MIG-P CA

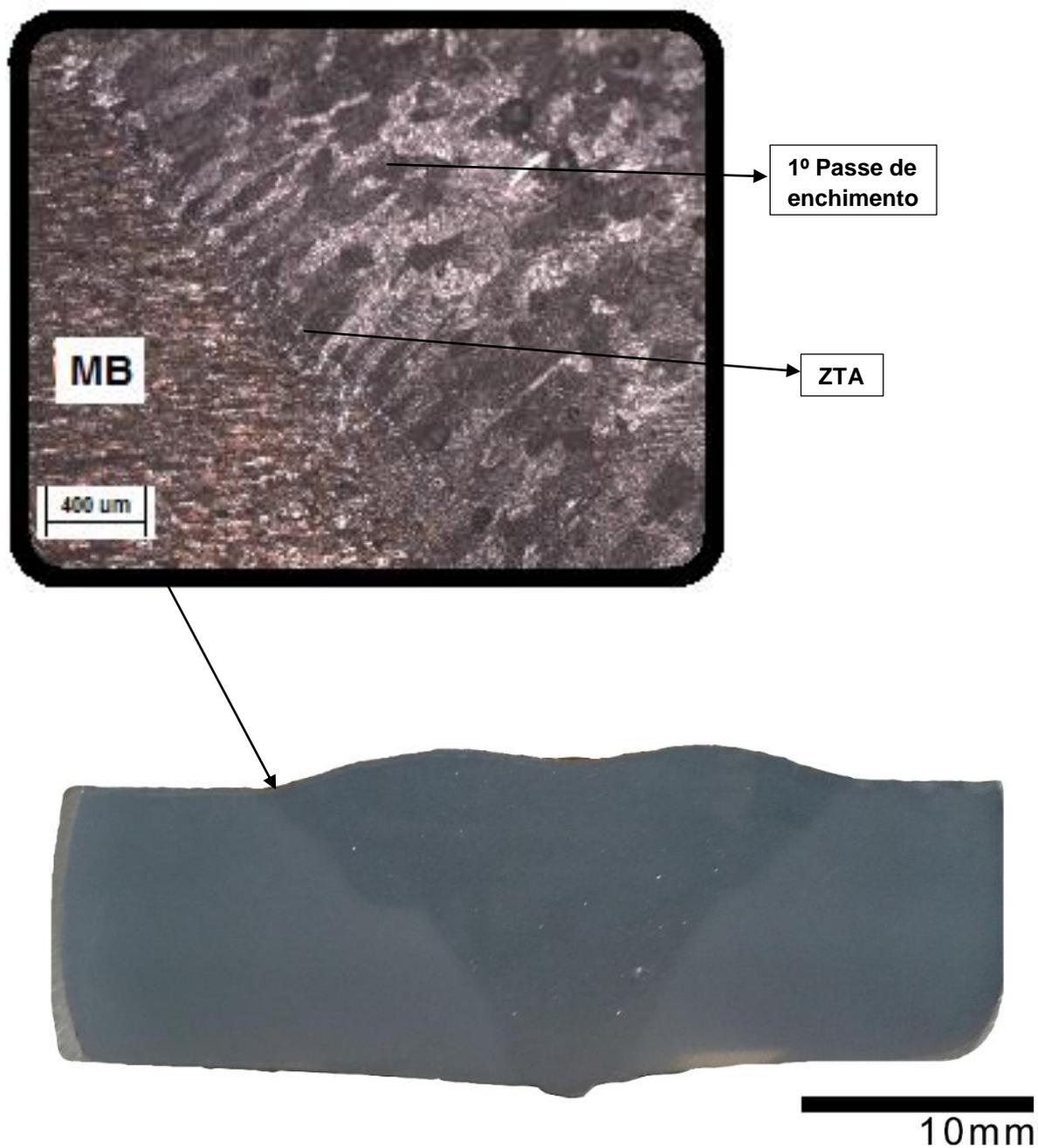


Figura 48. Macrografia com a técnica MIG-P CC+

Quando relacionados a microdureza, a técnica de soldagem MIG-P CC+ evidencia menores valores na zona fundida (Figura 49). O mesmo não ocorre com a outra técnica (Figura 50). Isto pode estar associado ao fato de que a mesma impõe maior energia durante a solda, resultando em uma menor taxa de resfriamento, possibilitando assim um maior grau de transformação e rearranjo dos grãos.

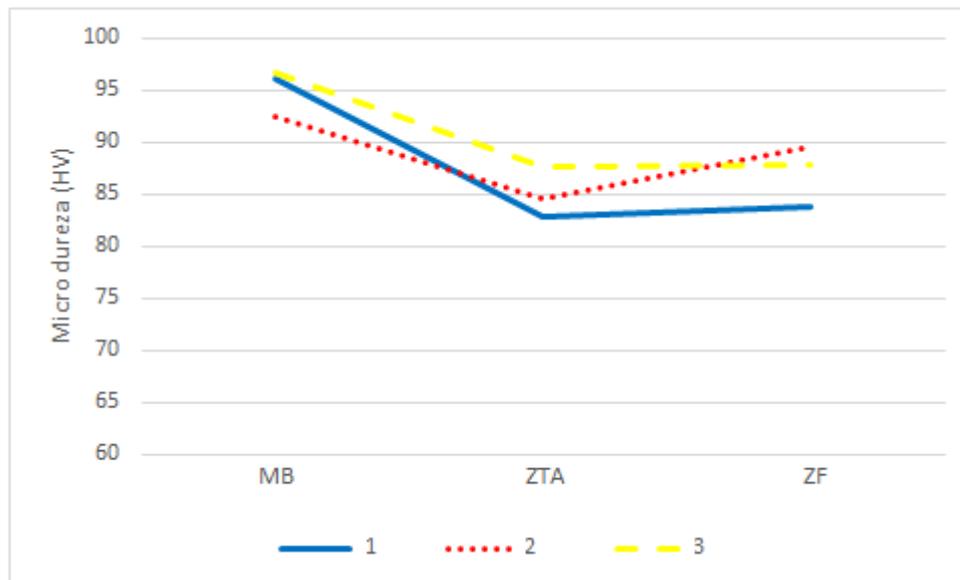


Figura 49. Microdureza obtida na chapa de 12 mm com a técnica MIG-P CA



Figura 50. Microdureza obtida na chapa de 12 mm com a técnica MIG-P CC+

4.4 AVALIAÇÃO DA TÉCNICA MIG CONVENCIONAL APLICADA AO PASSE DE ENCHIMENTO NOS CORPOS DE PROVA COM ESPESSURA DE 12 mm

Como mencionado no capítulo 3, fez-se necessário estudar o comportamento da técnica de soldagem MIG convencional aplicada ao passe de enchimento para os corpos de prova de 12 mm de espessura, visto que para a mesma espessura, quando aplicada a versão MIG-P CA, foram utilizadas correntes a cima da faixa de transição. A Tabela 17 apresenta os valores de médio de velocidade de arame e eficazes de corrente e tensão utilizando a técnica MIG convencional.

Tabela 17. Aquisições dos valores eficazes e médios pelo SAP utilizando a técnica MIG convencional

U_{ef} (V)	I_{ef} (A)	V_{am} (m/min)
25,1	168,0	9,0

No entanto, quando aplicada a mesma metodologia de comparação mencionada no capítulo 3, os experimentos realizados mostraram que a técnica MIG Convencional não se aplica, obtendo soldas de baixa qualidade com mordeduras e muito respingos. Isso pode ser explicado pois, durante a soldagem, não existe controle de transferência metálica resultando um cordão com bastante descontinuidade, além de elevado número de respingos. As Figuras 51 e 52 evidenciam tais descontinuidades.

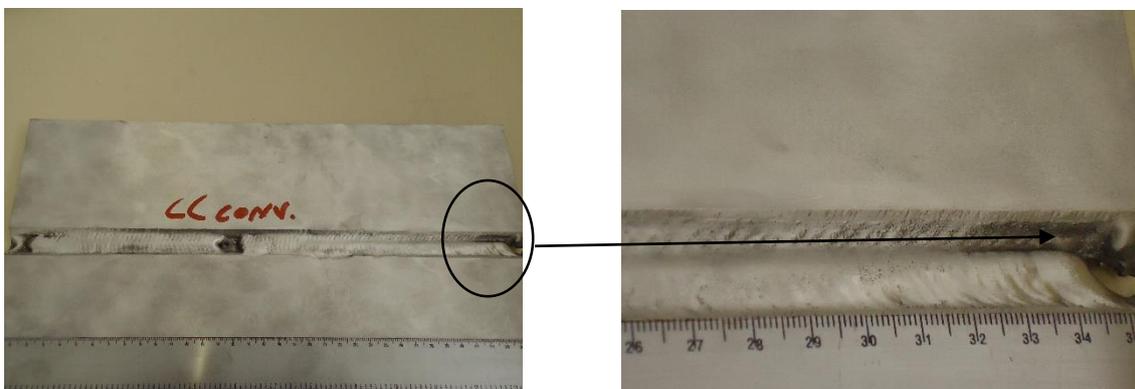


Figura 51. Cordão de solda com a técnica MIG convencional

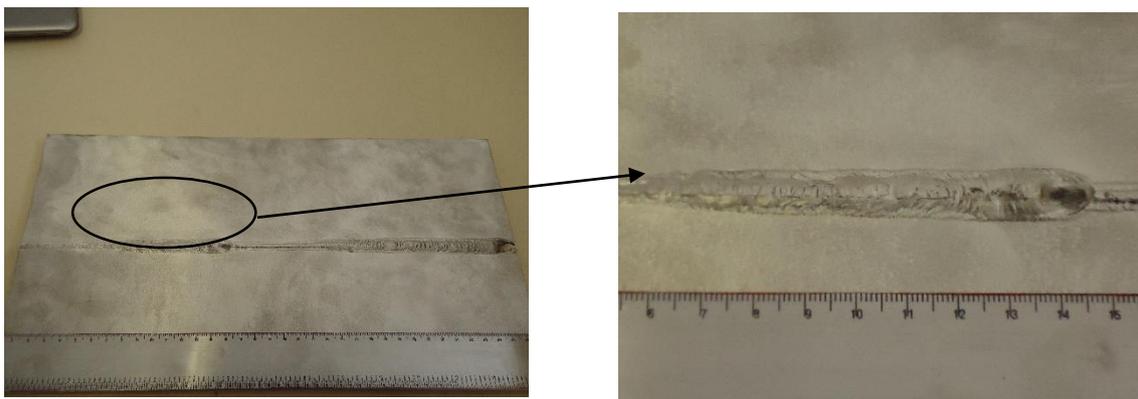


Figura 52. Cordão de solda com a técnica MIG convencional

Capítulo 5**Conclusões**

5. CONCLUSÕES

Nas condições estabelecidas neste trabalho, pode-se afirmar que:

- A técnica MIG-P CA se mostrou superior a MIG-P CC+ no tocante ao passe de enchimento, obtendo maior produtividade na soldagem;
- O arame ER5087 se mostrou superior ao ER 5183, obtendo melhores resultados no que diz respeito à qualidade da solda em ambas as espessuras do material de base e técnicas de soldagens utilizadas (MIG-P CA e MIG-P CC+);
- No que diz respeito a formação de defeitos, ambos os arames apresentaram poucos poros em um nível aceitável;
- Quando relacionado ao comportamento macrográfico, os resultados mostram que o arame ER5087 apresenta melhor uniformidade quando relacionado a zona fundida em ambas as versões de soldagem;
- A variante de soldagem MIG-P CC+ impôs maiores valores de temperatura durante a soldagem, influenciando diretamente no comportamento indesejável do deslocamento do passe de raiz.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugerem-se os seguintes temas para posterior investigação:

- Submeter as técnicas de soldagem MIG-P CC+ e MIG-P CA a maiores espessuras e a ensaios mecânicos seguindo normas navais, procurando assim determinar o limite de cada técnica em relação aos mesmos;
- Avaliar as técnicas de soldagem em outras posições de soldagem, estabelecendo assim a influência destas na qualidade da solda;
- Estudar a influência do tecimento e de técnicas de Switchback no comportamento geométrico aplicado ao passe de enchimento;
- Estudar novas formas de ondas para o processo MIG-P CA aplicadas ao passe de enchimento em ligas de alumínio.

REFERÊNCIAS

- ABAL. Alumínio: versatilidade e vantagens para o setor de transporte. <http://www.abal.org.br/noticias/lista_noticia.asp?id=124>. Acesso em: 15 Set. 2012.
- ALCAN, 1993, Manual de Soldagem, Alcan Alumínio do Brasil S/A, 1a Edição.
- ALTSHULLER, B., 1998, “A Guide to GMA Welding of Aluminum”, Welding Journal, volume 77, no 6, June, pp. 49-55.
- ASM Special Handbook, Aluminum and Aluminum Alloys, American Societ of Materials, p. 8-31, 231-247, 376-420, USA, 1993.
- ATES, H. Prediction of gas metal arc welding parameters based on artificial neural networks. Materials and Design, p. 2015-2023, 2007.
- BARRA, S. R. Influência do Processo MIG/MAG Térmico sobre a Microestrutura e a Geometria da Zona Fundida. Tese (Doutorado em engenharia mecânica). Universidade Federal de Santa Catarina; 2003.
- BILONI, H., Pérez, T.E., Saggese, M.E. & Solari, M.J.A., 1981, “Manual de Soldadura de Alumínio”, Proyecto Especial de Alumínio OEA – CNEA, Gerencia de Investigacion y Desarrollo, Aluar Alumínio Argentino, Buenos Aires, Argentina.
- BINGUL, Z.; COOK, G. E. A real time prediction model of electrode extension for GMAW. IEEE/ASME. Transactions On Mechatronics, v. 11, n. 1, p.47-54, 2006.
- CARY, H.B. (1994) Modern Welding Technology, 3ª edição, Regents Pretence-Hall, p. 183-196.
- CIRINO, L. M. Estudos dos Efeitos da Polaridade na Soldagem com Corrente Contínua e Alternada pelos Processos TIG e MIG/MAG [dissertação]. Florianópolis (SC): Universidade Federal de Santa Catarina; 2009.
- COPPERMETAL. Alumínio Naval 5083. <http://www.eutectic.com.br/folhetos_tecnicos/castomig_5183.pdf>. Acesso em: 10 Nov. 2013.
- FARIAS, J.P.; MIRANDA, H.C., MOTTA, M.F.; PAIVA, F.D.Q.; PESSOA, E.F. Efeito da Soldagem MIG/MAG em Corrente Alternada sobre a Geometria da Solda. Soldagem & Inspeção, v. 10, nº 4, p. 173-181, 2005.
- FLIR. Câmera térmica: <<http://www.flir.com/thermography/americas/br/view/?id=50093>>. Acesso em: 18 Nov. 2013.

HARRIS, I.D. Arc Welding Automotive Aluminum. Advanced Materials & Processes. V. 159, p. 52, Sep. 2001.

HATCH, J. E. Aluminium Properties and Physical Metallurgy. America Societ of Materials, USA 1996.

HILTUNEM, V.; PIETIKÄINEN, J. Investigations and Observations on Material Transfer in Metal-Inert-Gas (MIG) Welding. Arc Physics and Weld Pool Behaviour. p. 147-163, 1979.

IMC SOLDAGEM. SAP-4 - Sistema de Aquisição Portátil. Disponível em: <http://www.imc-soldagem.com.br/sap_4.html>. Acesso em: 03 Set. 2012.

IMC SOLDAGEM. Fontes de soldagem: DigiPLUS. Disponível em: <<http://www.imc-soldagem.com.br/digiplus.html>>. Acesso em: 03 Set. 2012.

KAMAL PAL and SURJYA K. PAL, Effect of Pulse Parameters on Weld Quality in Pulsed Gas Metal Arc Welding: A Review. Journal of Materials Engineering and Performance, Volume 20(6), 2011.

LABSOLDA TARTÍLOPE V2<
http://www.labsolda.ufsc.br/projetos/projetos_viabilizados/tartilope_v2.php>. Acesso em: 10 Ago. 2013.

MARQUES, Cleber. Prospecções da Natureza Física da Soldagem MIG do Alumínio Visando Automatização e Qualidade. 2012. 98 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC.

MARQUES, P. V., MODENESI, P. J. & VALENTE, O. B.: Características do Arco de Soldagem TIG em Diferentes Atmosferas, In: XXIV CONGRESSO NACIONAL DE TECNOLOGIA DA SOLDAGEM, 1998, CD-ROM.

SILVA, Celina Leal Mendes da. Avaliação de técnica de pulsação térmica na soldagem de alumínio. 2003. 127f. Tese (Doutorado em engenharia mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, Minas Gerais, 2003.

MIG-WELD. Datasheet: ML 5087. <
<http://www.migweld.de/english/products/aluminium/ml5087almg45mnzr.html>>. Acesso em: 17 Set. 2012.

MODENESI, P. J.; Soldagem I: Estimativas de custos em soldagem. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais – UFMG, 2001.

MODENESI, P. J.; MARQUES P. V.; SANTOS D. B.; Fontes de energia para a Soldagem a Arco. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais – UFMG, 2005.

- MULLIGAN, S. J., July 2003, "Pulsed MIG arc welding processes for joining of thin sheet aluminium", 771/2003 – TWI
- NORRISH, J. Gas metal arc welding. In: Advanced Welding Processes. IOP Publishing, Bristol, Philadelphia and New York, p.131-173, 1992.
- OKUMURA, T. & Taniguchi, C., 1982, "Engenharia de Soldagem e Aplicações", LTC, Rio de Janeiro, Brasil.
- PALANI, P.K.; MURUGAN, N. Selection of Parameters of Pulsed Current Gas Metal Arc Welding. Journal of Materials Processing Technology, v. 172, p. 1-10, Jul. 2005.
- PÓVOA, A.A., 1988, "Seminário Técnico de Soldagem do Alumínio e suas Ligas", Associação Brasileira do Alumínio, 26/10 a 17/11.
- QUINTINO, Bruno Miguel Duarte. Aplicação do processo de fricção linear (FSP) na melhoria da resistência à fadiga de juntas de topo soldadas por MIG na liga AA5083-H111. 2012. 77f. dissertação (Mestrado em engenharia mecânica) – Universidade de Coimbra, Portugal, 2012.
- REIS R. A. e Scotti, A., 1996, "Determinação de Parâmetros da Soldagem de Alumínio com Onda Retangular", XXII Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem, Blumenau, SC, pp. 619-630, Julho.
- RENCK, Tiago Samuel. Estudo das Propriedades Mecânicas de Juntas Soldadas em Alta Velocidade pelo Processo de Fricção e Mistura Mecânica. 2012. 84f. dissertação (Mestrado em engenharia mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande Do Sul, Porto Alegre, 2005.
- SCOTTI A.; PONOMAREV V. Soldagem MIG/MAG – Melhor entendimento, melhor desempenho. 1ª ed. Artliber; 2008.
- VIEIRA Jr. A. B., 1999, "Influência das Condições Superficiais do Alumínio na Estabilidade do Arco em Soldagem TIG", Dissertação de Mestrado, UFU, Agosto.
- WELD-INOX. Alumínio: versatilidade e vantagens para o setor de transporte. <http://www.weldinox.com.br/index.php?option=com_content&task=view&id=19&Itemid=44&subCat=21>. Acesso em: 21 Nov. 2013.