

**ANDRII MISHCHENKO**

**AVALIAÇÃO DO USO DA POLARIDADE NEGATIVA  
NA SOLDAGEM DE PASSES DE ENCHIMENTO PELO  
PROCESSO MIG/MAG DUPLO ARAME**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DA ENGENHARIA MECÂNICA**

**2014**

**ANDRII MISHCHENKO**

**AVALIAÇÃO DO USO DA POLARIDADE NEGATIVA NA SOLDAGEM  
DE PASSES DE ENCHIMENTO PELO PROCESSO MIG/MAG DUPLO  
ARAME**

**Dissertação** apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA.**

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Américo Scotti

**UBERLÂNDIA-MG  
2014**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

---

M678a Mishchenko, Andrii, 1991-  
2014 Avaliação do uso da polaridade negativa na soldagem de passes de  
enchimento pelo processo mig/mag duplo arame / Andrii Mishchenko.  
- 2014.  
118 f. : il.

Orientador: Américo Scotti.  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.  
Inclui bibliografia.

1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Soldagem - Teses. 3. Arco de  
soldagem a gás de metal. I. Scotti, Américo, 1955- II. Universidade  
Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia  
Mecânica. III. Título.

---

CDU: 621

## **AGRADECIMENTOS**

Ao meu orientador, Prof. Dr. Américo Scotti, pela ótima orientação, paciência e conselhos importantes durante a minha formação acadêmica e pessoal;

Aos Prof. Louriel Oliveira Vilarinho, Prof. Valtair Antonio Ferraresi, Prof. Volodymyr Ponomarov, pela transferência de conhecimentos;

Ao programa de Pós-graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica da UFU;

À CAPES, pelo suporte financeiro (bolsa de mestrado);

Ao LAPROSOLDA, pelo apoio técnico e laboratorial;

Aos meus pais Sergii e Nadiya pelo suporte moral e inspiração.

Ao Dumitru Caimacan, pela camaradagem e auxilio no desenvolvimento do trabalho;

**MISHCHENKO, A. Avaliação do Uso da Polaridade Negativa na Soldagem de Passes de Enchimento Pelo Processo MIG/MAG Duplo Arame.** 2014. 118 f. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

## RESUMO

É esperado dos passes de enchimento que haja penetração adequada, fusão nas laterais e uma taxa de deposição suficiente para encher a junta com o menor número de passes possíveis. Um dos processos do qual se espera grande eficácia neste sentido é o MIG/MAG Duplo Arame, que aumenta a produtividade do MIG/MAG convencional, mas mantendo a sua versatilidade. Uma outra forma visualizada para aumentar a capacidade de produção do processo MIG/MAG é uso do mesmo em polaridade negativa. Apesar de teoricamente simples, suas limitações reduzem sua aplicação na prática. Entretanto, pode-se vislumbrar a possibilidade de se aumentar a capacidade produtiva do MIG/MAG Duplo Arame através de uso da polaridade negativa. Assim, o objetivo geral deste trabalho foi avaliar o uso da combinação da polaridade positiva no arame-líder com a polaridade negativa no arame-seguidor na soldagem de passes de enchimento pelo processo MIG/MAG Duplo Arame. A avaliação foi feita através de um estudo comparativo entre a combinação convencional (dois arames no pulsado com polaridades positiva) e combinações com o arame líder em polaridade positiva, mas com polaridade negativa no arame-seguidor (pulsado polaridade negativa ou curto-circuito controlado polaridade negativa). Para os fins comparativos, manteve-se constante a corrente média para cada arame e a quantidade de metal depositado por unidade de comprimento da junta. Buscou-se avaliar a influência da polaridade negativa no arame-seguidor sobre a geometria do cordão de solda, acabamento superficial e capacidade produtiva da técnica. A avaliação foi feita em condições diferenciadas de realização de passes de enchimento, a saber, único passe na posição plana, em junta sobreposta de chapas finas, múltiplos passes na posição plana e passe único na posição sobrecabeça. Os resultados mostraram a viabilidade de técnica MIG/MAG Duplo Arame com polaridade negativa no arame-seguidor para soldagem de passes de enchimento na posição plana, por permitir preencher o mesmo tipo de junta em menos tempo e com menos energia de soldagem. Entretanto a técnica com uso da polaridade negativa não mostraram a viabilidade quando aplicadas na posição sobrecabeça.

**Palavras-chave:** MIG/MAG Duplo Arame; Polaridade Negativa; Passe de Enchimento

MISHCHENKO, A. **Assessment of the Negative Polarity Application in MIG/MAG Double Wire Process for Filling Passes.** 2014. 118 p. MSc. Thesis, Federal University of Uberlandia, MG, Brazil.

## ABSTRACT

It is expected from filling passes to present proper penetration, fusion on the groove-sides and enough deposition rate to fill up the joint with the fewest number of passes as possible. One of the methods from which is expected high efficiency on this aspect is the MIG/MAG Double Wire, which combines the versatility and practicality of the conventional MIG/MAG with an increased productivity. Another means of augmenting the MIG/MAG production capacity is the use of negative polarity. In spite of being a simple approach, its limitations refrain the process from practical applications. However, one can foresee a possibility to increase the MIG/MAG Double Wire production capacity through the use of negative polarity. Thus, the general objective of this work was to assess the combination of positive polarity in the leading wire with negative polarity in the trailing wire on the performance of the process when applied to filling passes. The assessment of this approach performance was carried out through a comparative study between the conventional combination (two wires working in pulsed mode with positive polarity) and combinations with positive polarity at the leading wire but negative polarity in the trailing wire (pulsed negative polarity or controlled short-circuit negative polarity). For comparative purposes, the average current of each wire and the amount of metal deposited per joint unit length were kept constant. The influence of the negative polarity in the trailing wire on the bead geometry, bead surface finish and process capacity was pursuit. The evaluation was made under different conditions of filling pass deposition, such as flat position single pass, lap joint of thin sheets, flat position multi-pass welding and an overhead position single pass. The results showed the viability of the MIG/MAG Double Wire with negative polarity in the trailing wire for filling passes welding in the flat position, once this approach allowed completing the same joint configuration faster and imputing less heat. However, the technique using negative polarity showed restriction when applied in the overhead position.

**Keywords:** MIG/MAG Double Wire; Negative Polarity; Filling Pass

## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas;
At	Área total;
CA	Corrente Alternada;
CBT	<i>Controlled Bridge Transfer;</i>
CC-	Corrente na polaridade negativa;
CC+	Corrente na polaridade positiva;
Im	Corrente media;
Ip	Corrente de pulso;
Irms	Corrente eficaz;
I <sub>t</sub>	Corrente de transição;
I <sub>b</sub>	Corrente de base;
CCC	Curto-Círcuito Controlado;
CMT	<i>Cold Metal Transfer;</i>
DA	Duplo Arame;
DBCP	Distância bico de contato-peça;
ER	Eletrodo Revestido;
FCAW	<i>Flux-Cored Arc Welding;</i>
GMAW	<i>Gas Metal Arc Welding;</i>
GTAW	<i>Gas Tungsten Arc Welding;</i>
IIW	<i>International Institute of Welding;</i>
L	Largura do cordão;
Laprosolda	Centro para Pesquisa e Desenvolvimento de Processos de Soldagem;
MIG/MAG	<i>Metal Inert Gas/Metal Active Gas;</i>
MIG/MAG DA	Soldagem <i>Metal Inert Gas/Metal Active Gas</i> com Duplo Arame;

P	Penetração do cordão;
PI	Potencial Isolado;
PU	Potencial Único;
Q	Quantidade de metal depositado por comprimento do cordão de solda;
R	Reforço do cordão;
RPM	Rotações por minuto;
tb	Tempo de base;
TIG	<i>Tungsten Inert Gas;</i>
T.I.M.E	<i>Transferred Ionized Molten Energy;</i>
tp	Tempo de pulso;
UFU	Universidade Federal de Uberlândia;
U <sub>m</sub>	Tensão media;
U <sub>rms</sub>	Tensão eficaz;
USB	<i>Universal Serial Bus;</i>
V <sub>a</sub>	Velocidade de alimentação do arame;
V <sub>at</sub>	Velocidade de alimentação total dos dois arames;
V <sub>s</sub>	Velocidade de soldagem;
ZAC	Zona Afetada pelo Calor.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 -	Uma junta de topo com representação de processos de soldagem, onde: TIG - soldagem com eletrodo não consumível de tungstênio; ER - soldagem com eletrodo revestido; FCAW - soldagem com arame tubular; MIG/MAG - soldagem por arco elétrico com gás de proteção (KOVALENKO, 2014)	1
Figura 2.1 -	Esquematização de distinção dos arames com detalhes de ângulo de ataque, sendo em (a) empurrando, (b) reto e (c) puxando	5
Figura 2.2 -	Tipos de configurações de tochas para soldagem MIG/MAG Duplo Arame a) duas tochas convencionais fixadas num suporte; b) tochas com potencial isolado (PESSOA, 2007; HACKL, 1999; BLACKMAN, 2002)	6
Figura 2.3 -	Cordões de solda com penetração total obtidos em diferentes espessuras de chapas((a) 5 mm, (b) 8 mm, (c) 9,5 mm e (d) 11 mm) com MIG/MAG DA (STERJOVSKI et al., 2012)	9
Figura 2.4 -	Trincas de solidificação em cordões de solda feitos com MIG/MAG Duplo Arame: da esquerda para direita, espessuras de 8, 9, 5 e 11 mm (STERJOVSKI et al., 2012)	10
Figura 2.5 -	Combinações de distância e inclinação dos eletrodos avaliadas por (HEDEGARD et al., 2004)	12
Figura 2.6 -	Variação de ângulo e da distância entre os eletrodos avaliadas por (UEYAMA et al., 2005)	12
Figura 2.7 -	Relação da distância entre os arames e a quantidade de interrupções (REIS et al., 2010)	14
Figura 2.8 -	Chapas soldadas em junta sobreposta com técnica CBT CC- (ERA et al., 2013)	20
Figura 3.1 -	Ilustração da sincronização entre as fontes de soldagem para se trabalhar com os modos Pulsado-Pulsado de forma defasada em Soldagem MIG/MAG duplo arame	25
Figura 3.2 -	Esquematização de medição da distância bico de contato-peça	27
Figura 3.3 -	Apresentação do esquema de medição de parâmetros geométricos do cordão de solda com detalhe em: ZAC = zona afetada pelo calor, P = penetração, R = reforço e L = largura	28
Figura 3.4 -	Apresentação de banca experimental utilizada no desenvolvimento do trabalho	30

Figura 3.5 -	Visualização das ferramentas utilizadas para fixação de placas de teste na posição plana em (a) - soldagem de passe de enchimento; (b) - soldagem multipasse e (c) - soldagem de chapa fina	30
Figura 3.6 -	Suportes para fixação de placas de teste para soldagem de passe de enchimento na posição sobre cabeças	31
Figura 3.7 -	Tochas de soldagem MIG/MAG Duplo Arame utilizadas no desenvolvimento do trabalho em (a) detalhe de distância entre os eletrodos da tocha TBi TD9 e em (b) detalhe de distância entre os eletrodos da tocha Binzel	32
Figura 3.8 -	Interface gráfica do programa de aquisição de dados	33
Figura 4.1 -	Esquematização da hipótese de se usar a corrente Pulsada na polaridade negativa	38
Figura 4.2 -	Onda completa de modo operacional Curto-circuito Controlado onde: Ia1 - corrente de pico de arco; Ia2 - corrente para aumento da taxa de fusão; ta1 - tempo da corrente Ia1; ta2 - tempo da corrente Ia2; Ia3 - corrente de manutenção do arco; di3 - taxa de variação de subida da corrente durante o curto em A/ms; tr1 - tempo de rampa do patamar 1 para o patamar 2; tr2 - tempo de rampa do patamar 2 para o patamar 3; tc1 - tempo assentamento da gota; tc2 - tempo espera de reabertura; Ic1 - corrente de assentamento de gota; Ic2 - corrente de rompimento da ponte metálica	40
Figura 5.1 -	Placa de teste utilizada na soldagem de passes de enchimento em um único passe na posição plana	42
Figura 5.2 -	Esquematização da posição da tocha de soldagem em relação à placa de teste: em (a) detalhe distância bico de contato-peça; em (b) detalhe para o ângulo de ataque, de trabalho e direção de soldagem	43
Figura 5.3 -	Oscilogramas típicos de corrente e tensão ao se usar a combinação Pulsado(+) - Pulsado(+)	44
Figura 5.4 -	Aspecto visual e seção transversal dos cordões de solda feitos em um único passe ao se usar a combinação Pulsado(+) - Pulsado(+)	45
Figura 5.5 -	Aspecto visual e seção transversal dos cordões de solda feitos em um único passe ao se usar a combinação Pulsado(+) - Pulsado(-)	46
Figura 5.6 -	Oscilogramas típicos de corrente e tensão ao se usar a combinação Pulsado(+) - Pulsado(-)	47
Figura 5.7 -	Aspecto visual e seção transversal dos cordões de solda feitos em um único passe ao se usar a combinação Pulsado(+) - CCC(-)	48
Figura 5.8 -	Oscilogramas típicos de corrente e tensão ao se usar a combinação	48

Pulsado(+) - CCC(-)		
Figura 5.9 -	Aparência visual e seção transversal dos cordões de solda das três combinações a serem comparados	50
Figura 5.10 -	Parâmetros geométricos de cordões de solda feitos com três combinações em um único passe na posição plana	51
Figura 5.11 -	Envelope operacional para cada combinação quanto à velocidade de soldagem	54
Figura 6.1 -	Preparação de placas de teste para soldagem de chapas finas em junta sobreposta	55
Figura 6.2 -	Esquematização da posição da tocha de soldagem em relação à placa de teste: em (a) detalhe do ângulo de trabalho, distância bico de contato-peça; (b) fixação de placa de teste sobre a mesa de soldagem, feita com auxílio de barras aparafusadas em uma base metálica rígida, com detalhe para o ângulo de ataque e direção de soldagem	56
Figura 6.3 -	Aspecto visual e seção transversal dos cordões de solda feitos em junta sobreposta ao se usar a combinação Pulsado(+) - Pulsado(-)	57
Figura 6.4 -	Oscilogramas típicos de corrente e tensão da combinação Pulsado(+) - Pulsado(-)	58
Figura 6.5 -	Oscilogramas típicos de corrente e tensão ao se usar a combinação Pulsado(+) - Pulsado(+)	59
Figura 6.6 -	Aspecto visual e seção transversal dos cordões de solda feitos em junta sobreposta ao se usar a combinação Pulsado(+) - Pulsado(+)	59
Figura 6.7 -	Aspecto visual e seção transversal dos cordões de solda feitos em junta sobreposta ao se usar a combinação Pulsado(+) - CCC(-)	60
Figura 6.8 -	Oscilogramas típicos de corrente e tensão ao se usar a combinação Pulsado(+) - CCC(-)	61
Figura 6.9 -	Aparência visual e seção transversal dos cordões de solda feitos em junta sobreposta para três combinações a serem comparados	62
Figura 6.10 -	Envelope operacional para cada combinação quanto à velocidade de soldagem para soldagens de chapas finas sobrepostas em uma mesma corrente média e quantidade de metal depositado	65
Figura 7.1 -	Especificação de formato e dimensões da placa de teste em (a) barra chata utilizada na confecção de placas de teste e (b) detalhe de dimensões do chanfro	67

Figura 7.2 - Aparência do chanfro após a usinagem	67
Figura 7.3 - Posicionamento da tocha de soldagem em relação à placa de teste: em (a) - detalhe de medição de distância bico de contato-peça no primeiro passe; (b) - medição de distância bico de contato peça nos passes posteriores e (c) - detalhe quanto a ângulo de trabalho e ângulo de ataque	69
Figura 7.4 - Aspecto visual e seção transversal do cordão de solda feito em múltiplos passes ao se usar a combinação Pulsado(+) - Pulsado(+)	70
Figura 7.5 - Aspecto visual e seção transversal do cordão de solda feito em múltiplos passes ao se usar a combinação Pulsado(+) - Pulsado(-)	71
Figura 7.6 - Aspecto visual e seção transversal do cordão de solda feito em múltiplos passes ao se usar a combinação Pulsado(+) - CCC(-)	72
Figura 7.7 - Aparência visual e seção transversal dos cordões de solda feitos em múltiplos passes para as três combinações a serem comparadas	73
Figura 7.8 - Parâmetros geométricos de cordões de solda feitos com três combinações ao se soldar na condição de soldagem multipasse na posição plana	74
Figura 8.1 - Apresentação do suporte para fixação de placa de teste ao se soldar passe de enchimento na posição sobrecabeça	77
Figura 8.2 - Esquematização da medição de distância bico de contato-peça (DBCP) e posicionamento da tocha em relação à placa de teste para condição de soldagem de passes de enchimento na posição sobrecabeça	77
Figura 8.3 - Aspecto visual dos cordões de solda e suas seções transversais feitos em um único passe na posição sobrecabeça ao se usar a combinação Pulsado(+) - Pulsado(+)	79
Figura 8.4 - Oscilogramas típicos de corrente e tensão ao se soldar com combinação Pulsado(+) - Pulsado(+)	80
Figura 8.5 - Oscilogramas típicos de corrente e tensão ao se soldar com combinação Pulsado(+) - Pulsado(-)	81
Figura 8.6 - Aspecto visual do cordão de solda feito na combinação Pulsado(+) - Pulsado(-), posição sobrecabeça	81
Figura 8.7 - Oscilogramas típicos adquiridos durante a soldagem com CCC(-) e com um único arame (corrente média 180 A)	82
Figura 8.8 - Aspecto visual do cordão de solda ao se soldar com um único arame trabalhando em CCC(-) na posição sobrecabeça (corrente média	83

almejada de 180 A)	
Figura 8.9 - Aspecto visual dos cordões de solda feito com um único arame trabalhando em CCC(-) em diferentes velocidades de soldagem (corrente média almejada de 140 A)	83
Figura 8.10 - Envelope operacional de velocidades de soldagem para a combinação Pulsado(+) - Pulsado(+) ao se soldar passe de enchimento em um único passe na posição sobrecabeça	84
Figura 8.11 - Esquematização de um modelo da transferência metálica em soldagem CCC(-)/Pulsado(-) na posição sobrecabeça por analogia com um conta-gotas	85
Figura 8.12 - Aparência da ponta do arame após a soldagem com Pulsado(+) - CCC(-) na posição sobrecabeça	85
Figura 8.13 - Aparência do bocal e do difusor de gás após a soldagem na posição sobrecabeça com combinações Pulsado(+) - Pulsado(-) e Pulsado(+) - CCC(-)	85

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 -	Comparação de limite de resistência dos cordões de solda feitos com MIG/MAG DA e MIG/MAG convencional (FANG et al., 2012)	11
Tabela 2.2 -	Energia absorvida em ensaio de impacto na ZAC e no metal de solda a -20 °C (FANG et al., 2012)	11
Tabela 2.3 -	Combinações de modos operacionais de corrente avaliadas por (STAUFER, 2012)	19
Tabela 3.1 -	Combinações dos modos operacionais para os arames líder e seguidor e respectiva representação proposta neste trabalho	25
Tabela 3.2 -	Composição química nominal do arame-eletrodo utilizado nesse trabalho (AWS, 2005)	29
Tabela 3.3 -	Verificação da composição química de gás de proteção	29
Tabela 3.4 -	Representação das tochas de soldagem utilizadas nesse trabalho	32
Tabela 4.1 -	Variáveis de regulagem encontradas para combinação Pulsado(+) - Pulsado(+), para uma DBCP de 21 mm e proteção com Ar+8%CO <sub>2</sub>	37
Tabela 4.2 -	Variáveis de regulagem encontradas para a combinação Pulsado(+) - Pulsado(-), para um DBCP de 21 mm e proteção com Ar+8%CO <sub>2</sub>	38
Tabela 4.3 -	Variáveis encontradas para a combinação Pulsado(+) - CCC(-), para uma DBCP de 21 mm e proteção com Ar+ 8%CO <sub>2</sub>	39
Tabela 5.1 -	Parâmetros de usinagem e a ferramenta utilizada na confecção dos chanfros	42
Tabela 5.2 -	Variáveis de regulagem e monitorados ao se usar a combinação Pulsado(+) - Pulsado(+)	44
Tabela 5.3 -	Variáveis de regulagem e monitorados ao se usar a combinação Pulsado(+) - Pulsado(-)	46
Tabela 5.4 -	Variáveis de regulagem ao se usar a combinação Pulsado(+) - CCC(-)	47
Tabela 5.5 -	Variáveis monitorados ao se usar a combinação Pulsado(+) - CCC(-)	49
Tabela 5.6 -	Valores dos parâmetros monitorados para três combinações na soldagem de passe de enchimento em um único passe	50
Tabela 5.7 -	Dados típicos de características econômicas das combinações para realizarem cordões de mesmo volume	53
Tabela 6.1 -	Variáveis de regulagem e monitorados ao se usar a combinação	57

Pulsado(+) - Pulsado(-)		
Tabela 6.2 -	Variáveis de regulagem e monitorados ao se usar a combinação Pulsado(+) - Pulsado(+)	58
Tabela 6.3 -	Variáveis de regulagem ao se usar a combinação Pulsado(+) - CCC(-)	60
Tabela 6.4 -	Variáveis monitorados ao se usar a combinação Pulsado(+) - CCC(-)	60
Tabela 6.5 -	Valores dos parâmetros monitorados para três combinações na soldagem de chapas finas em junta sobreposta	61
Tabela 6.6 -	Dados típicos de características econômicas das combinações para realizarem cordões de mesmo volume	64
Tabela 7.1 -	Parâmetros de usinagem e ferramenta utilizados na confecção de chanfro para condição de soldagem multipasse	68
Tabela 7.2 -	Variáveis de regulagem e monitorados ao se usar a combinação Pulsado(+) - Pulsado(+)	70
Tabela 7.3 -	Variáveis de regulagem e monitorados ao se usar a combinação Pulsado(+) - Pulsado(-)	71
Tabela 7.4 -	Variáveis de regulagem ao se usar a combinação Pulsado(+) - CCC(-)	72
Tabela 7.5 -	Variáveis monitorados ao se usar a combinação Pulsado(+) - CCC(-)	72
Tabela 7.6 -	Dados típicos de eficiência de deposição das combinações avaliadas	74
Tabela 7.7 -	Valores dos parâmetros monitorados para três combinações na soldagem de passe de enchimento em múltiplos passes	74
Tabela 8.1 -	Variáveis de regulagem e monitorados na soldagem de passes de enchimento com combinação Pulsado(+) - Pulsado(+) na posição sobre cabeça	78
Tabela 8.2 -	Variáveis de regulagem e monitorados na soldagem de passes de enchimento com combinação Pulsado(+) - Pulsado(-) na posição sobre cabeça	80
Tabela 8.3 -	Variáveis de regulagem ao se soldar com um único arame trabalhando em CCC(-) na posição sobre cabeça	82
Tabela 8.4 -	Variáveis monitorados ao se soldar com um único arame trabalhando em CCC(-) na posição sobre cabeça	82

# SUMÁRIO

<b>RESUMO</b>	vi
<b>ABSTRACT</b>	vii
<b>LISTA DE ABREVIATURAS/ESÍMBOLOS</b>	viii
<b>LISTA DE FIGURAS</b>	x
<b>LISTA DE TABELAS</b>	xv
<b>CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO</b> .....	1
<b>CAPÍTULO II - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	4
2.1 - Definição da técnica .....	4
2.2 - Fontes de soldagem .....	5
2.3 - Tochas para soldagem MIG/MAG Duplo Arame .....	6
2.4 - Vantagens e desvantagens do processo .....	6
2.4.1 - <i>Velocidade de soldagem</i> .....	6
2.4.2 - <i>Taxa de deposição</i> .....	8
2.4.3 - <i>Penetração</i> .....	8
2.5 Qualidade dos cordões de solda .....	9
2.5.1 - <i>Presença de descontinuidades</i> .....	9
2.5.2 - <i>Tensões e deformações</i> .....	10
2.5.3 - <i>Propriedades mecânicas da junta soldada</i> .....	10
2.6 - Influência de variáveis do MIG/MAG DA sobre a estabilidade e formação do cordão de solda .....	11
2.6.1 - <i>Espaçamento e ângulo entre os eletrodos</i> .....	11

2.6.2 - <i>Distância bico de contato-peça (DBCP)</i> .....	14
2.7 - Consumíveis .....	15
2.7.1 - <i>Metal de adição</i> .....	15
2.7.2 - <i>Gás de proteção</i> .....	16
2.8 - Modos operacionais de corrente em cada arame .....	17
2.9 - O uso de corrente na polaridade negativa .....	20
2.10 - Soldagem fora da posição plana .....	21
2.11 - Aplicações industriais .....	21
<b>CAPITULO III - METODOLOGIA, INSUMOS E EQUIPAMENTOS</b> .....	24
3.1 - Metodologia .....	24
3.2 - Insumos .....	28
3.3 - Equipamentos e bancada experimental .....	29
<b>CAPITULO IV - DEFINIÇÃO DE PARÂMETROS DE SOLDAGEM</b> .....	34
4.1 - Definição de parâmetros da combinação Pulsado(+) - Pulsado(+) .....	35
4.2 - Definição dos parâmetros para Pulsado(-) .....	37
4.3 - Definição de parâmetros para o modo operacional CCC(-) .....	39
<b>CAPITULO V - SOLDAGEM DE PASSE DE ENCHIMENTO EM ÚNICO PASSE NA POSIÇÃO PLANA</b> .....	41
5.1 - Preparação de placas de teste para soldagem .....	41
5.2 - Resultados .....	44
5.2.1 - <i>Soldagem com combinação Pulsado(+) - Pulsado(+)</i> .....	44
5.2.2 - <i>Soldagem com combinações Pulsado(+) - Pulsado(-) e Pulsado(+) - CCC(-)</i> .....	45
5.3 - Discussão dos resultados .....	49
<b>CAPITULO VI - SOLDAGEM DE CHAPAS FINAS EM UMA JUNTA SOBREPOSTA NA POSIÇÃO PLANA</b> .....	55
6.1 - Preparação de placa de teste e sua fixação durante soldagem .....	55

6.2 - Resultados .....	57
6.2.1 - Soldagem com combinação Pulsado(+) - Pulsado(-) .....	57
6.2.2 - Soldagem com combinação Pulsado(+) - Pulsado(+) e Pulsado(+) - CCC(-) .....	58
6.3 - Discussão dos resultados .....	61
<b>CAPITULO VII - SOLDAGEM MIG/MAG DUPLO ARAME EM MÚLTIPLOS PASSES (MULTIPASSE) DE UMA JUNTA DE TOPO NA POSIÇÃO PLANA .....</b>	66
7.1 - Preparação de placa de teste .....	66
7.2 - Posicionamento da tocha em relação à placa de teste e considerações gerais .....	68
7.3 - Resultados .....	70
7.3.1 - Soldagem com combinação Pulsado(+) - Pulsado(+) .....	70
7.3.2 - Soldagem com combinações Pulsado(+) - Pulsado(-) e Pulsado(+) - CCC(-) .....	71
7.4 - Discussão dos resultados .....	73
<b>CAPITULO VIII - SOLDAGEM DE PASSE DE ENCHIMENTO EM ÚNICO PASSE NA POSIÇÃO SOBRECABEÇA .....</b>	76
8.1 - Preparação de placa de teste e posicionamento da tocha de soldagem .....	76
8.2 - Resultados .....	78
8.2.1 - Soldagem com combinação Pulsado(+) - Pulsado(+) .....	78
8.2.2 - Soldagem com combinação Pulsado(+) - Pulsado(-) .....	80
8.2.3 - Soldagem com combinação Pulsado(+) - CCC(-) .....	81
8.3 - Discussão dos resultados .....	83
<b>CAPITULO IX - CONCLUSÕES .....</b>	87
<b>CAPITULO X - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	89
<b>CAPITULO XI - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	91
<b>Anexo I - Características das fontes de soldagem e do sistema de aquisição de dados .....</b>	98
<b>Apêndice I - Calibração dos equipamentos utilizados ao longo do trabalho .....</b>	99

# CAPÍTULO I

## INTRODUÇÃO

Dependendo da espessura do material de base e preparação do chanfro, a junta pode ser soldada em um passe único ou em múltiplos passes. No caso, sempre se inicia pelo passe de raiz, seguido pelos passes quente, de enchimento e de acabamento. Para uma melhor visualização na Fig. 1.1 está apresentada uma junta de topo com respectivos passes e processos de soldagem que podem ser utilizados na sua confecção.

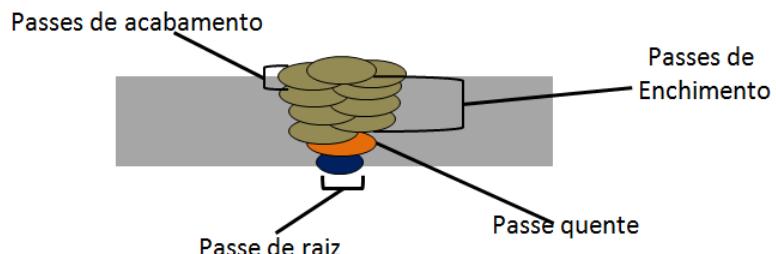


Figura 1.1 - Representação dos passes para preenchimento da junta

Tradicionalmente, considera-se o passe de raiz como o passe mais importante da junta. Portanto, o mesmo recebe muita atenção no meio científico e industrial, principalmente pela demanda do aumento da produtividade de sua aplicação. A automatização do passe de raiz tem sido tema de muitos trabalhos. Por exemplo, no próprio Laprosolda foram desenvolvidos duas dissertações do mestrado nos últimos três anos, Skhabovskyi (2014) e Kovalenko (2014), que visaram a automação da soldagem do passe de raiz. Entretanto o passe de enchimento não vem recebendo tanta atenção, o que não é coerente pois da rapidez e

qualidade de sua execução que vai depender o tempo total de se fazer uma junta soldada.

Qualquer que seja a quantidade de passes para se fazer o enchimento do chanfro, as características mais importantes que se procura na sua execução são penetração adequada e uma completa fusão nas laterais da junta e entre os passes. Uma outra característica importante é o volume de metal depositado que deve ser suficientemente grande para preencher a junta com menor quantidade de passes.

Na confecção de passes de enchimento, usa-se tradicionalmente o Eletrodo Revestido, MIG/MAG ou Arco Submerso. De acordo com Junior et al. (2013), o Eletrodo Revestido (ER) é um processo de baixa capacidade de produção e, por isso, na indústria moderna tem-se a tendência de se substituí-lo por processos mais versáteis e de fácil automatização, tais como soldagem MIG/MAG ou Arco Submerso. O Arco Submerso tem ganhos como elevadas taxas de deposição, mas a sua baixa mobilidade e versatilidade não compensam o aumento da produtividade. Já o MIG/MAG se apresenta como de alta mobilidade, versatilidade e de fácil automação, aliado às altas taxas de deposição, como citam Deruntz (2003) e Gonçalves et al. (2005). Porém, como foi avaliado por Dzelnitzki (1999) e Ueyama et al. (1999), no nível atual de desenvolvimento tecnológico o MIG/MAG já não atende as demandas do mercado. O processo possui duas limitações relacionadas à taxa de deposição e velocidade de soldagem. De acordo com Ueyama et al. (1999) acima de uma certa relação velocidade de soldagem/corrente começam aparecer descontinuidades, tais como mordedura, porosidade e costa de dragão. Outras limitações do processo MIG/MAG são as dificuldades operacionais, que demandam regulagens precisas para evitar excesso de respingos e acabamento deficiente do cordão.

Para se aumentar a capacidade produtiva do processo foram desenvolvidos processos derivativos e técnicas híbridas do processo MIG/MAG convencional com outros processos de soldagem. Um desses processos é o MIG/MAG Duplo Arame. Com a duplicação do número de arames foi possível aumentar a taxa de deposição do metal de adição, mantendo-se a transferência metálica estável em cada arame.

O MIG/MAG Duplo Arame basicamente é uma duplicação do processo MIG/MAG convencional que na sua forma mais recente utiliza dois eletrodos paralelos ou inclinados um em relação ao outro que podem ser dispostos de maneira sequencial (um atrás do outro) ou lado ao lado. Na configuração mais utilizada na prática, o MIG/MAG Duplo Arame utiliza eletrodos eletricamente isolados. Existe uma outra abordagem sem isolamento elétrico entre os eletrodos, que foi avaliada por Groetelaars e Scotti (2007) como problemática em termos

de estabilidade da transferência metálica e alta geração de respingos. A instabilidade é provocada pela interação magnética entre os arcos, que, segundo Gonzales e Dutra (1999), é inevitável, devido a ambos os eletrodos estarem submetidos ao mesmo potencial. O sistema com potencial isolado, no qual a corrente de cada fonte passa por bicos de contatos distintos, tem permitido se trabalhar com os limites de correntes em cada arame de forma independente. Além disto, o sistema potencial isolado permite ao usuário trabalhar com diferentes modos operacionais de corrente em cada arame. Por exemplo, o primeiro arame pode atuar no modo corrente pulsada e segundo no modo tensão constante e assim por diante. Tal possibilidade de se usar modos operacionais distintos em cada arame apresenta vantagens no tocante ao aumento da flexibilidade operacional deste processo.

Na direção de aproveitar a possibilidade de se trabalhar com modos operacionais diferentes no cada arame, uma outra forma visualizada para aumentar a capacidade de produção do processo MIG/MAG Duplo Arame seria pela aplicação da polaridade negativa no arame seguidor. O uso da corrente negativa no processo MIG/MAG convencional não encontrou muita aplicação na prática devido às suas limitações operacionais, ligadas à transferência metálica e estabilidade do processo, como cita Norrish (2006). Por outro lado, Souza et al. (2010) investigaram que o emprego da polaridade negativa apresenta uma grande vantagem no tocante ao aumento da taxa de fusão do arame. Os autores concluíram que a soldagem MIG/MAG com polaridade negativa nem sempre é limitada e que existem outros fenômenos, ligados com gás de proteção, que têm grande influência sobre a estabilidade do processo e formação do cordão de solda.

Assim, propõe-se neste trabalho aliar a alta penetração típica da soldagem na polaridade positiva com aumento da taxa de fusão na polaridade negativa, o que, por hipóteses, poderia fazer um passe de enchimento com uma produtividade e versatilidade superior. Ou seja, o objetivo geral desse trabalho é avaliar o uso da polaridade negativa em soldagens de passes de enchimento pela técnica MIG/MAG DuploArame.

## CAPÍTULO II

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 2.1 - Definição do processo

Segundo Scotti e Ponomarev (2008), o processo MIG/MAG Duplo Arame pode ser definido como derivado do processo MIG/MAG convencional, que se baseia na formação de dois arcos elétricos por dois arames alimentados continuamente. A proteção da região de solda é feita da mesma forma em que no MIG/MAG convencional. Existem outras definições semelhantes que abordam mais detalhes em termos de equipamento e configuração da tocha de soldagem, mas mesmo na sua versão mais recente, a norma AWS A3.0:2010 não fornece qualquer definição do processo.

De acordo com Anderson et al. (2006) no meio científico e industrial alguns autores denominam "Tandem MIG/MAG Welding" como soldagem com dois arames com potencial isolado e "Twin MIG/MAG Welding" como soldagem com potencial único. Outros usam o termo "Tandem" para denominar a soldagem com dois arames em série, ou seja, um atrás do outro (independente se for potencial único ou isolado). O termo "TWIN" nesse caso usa-se para soldagem com eletrodos dispostos um ao lado do outro. Porém, a forma mais universal de se referenciar ao processo seria soldagem MIG/MAG Duplo Arame, especificando se é Potencial Único ou Potencial Isolado (PU/PI) e destacando-se o posicionamento dos eletrodos, como "MIG/MAG Duplo Arame Potencial Único/Isolado" ou pela abreviação MIG/MAG DA com PU/PI. Como neste trabalho pretende-se abordar somente a variação do processo com potencial isolado, adotou-se como abreviação MIG/MAG DA.

Para distinguir os arames é comum chamá-los de acordo com o sentido de soldagem. O arame de frente é comumente chamado "líder" e arame de trás "seguidor", como

resumindo na Fig. 2.1. Os arames podem ser inclinados de modo "empurrando", "reto" ou "puxando".

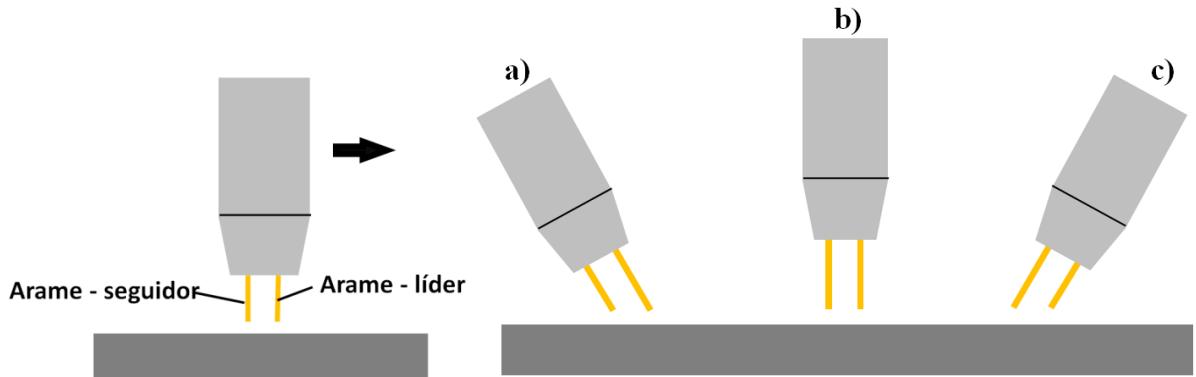


Figura 2.1 - Esquematização de distinção dos arames com detalhes de ângulo de ataque, sendo em (a) empurrando, (b) reto e (c) puxando

## 2.2 - Fontes de soldagem

Semelhante a MIG/MAG com único arame, em MIG/MAG DA usa-se dois tipos de fontes, do tipo corrente constante ou tensão constante. Embora ambos os tipos possam ser usados, geralmente utiliza-se fontes eletrônicas que podem ser ajustados para funcionar com características corrente constante ou tensão constante como citam Yudodibroto et al. (2008). Por outro lado, o tipo de característica estática da fonte na soldagem com corrente pulsada em ambos os arames pode influenciar a estabilidade do processo. Hedegard et al. (2007) na soldagem MIG/MAG DA com corrente pulsada empregaram durante a corrente de base característica "tensão constante" e durante corrente de pico a "corrente constante" e vice versa. Os autores chegaram à conclusão de que a melhor estabilidade do processo acontece quando a característica estática é do tipo "tensão constante" para corrente de pico e "corrente constante" para corrente de base. Nesse sentido, Motta e Dutra (2001) avaliaram a influência do tipo da característica estática da fonte sobre a produtividade (taxa de fusão) do processo MIG/MAG DA com PI. Os autores concluíram que a tensão constante nos ambos os arames mostrou uma maior taxa de fusão, comparando com a corrente pulsada.

## 2.3 - Tochas para soldagem MIG/MAG Duplo Arame

Para montar um sistema de soldagem MIG/MAG com dois arames, não se precisa de um equipamento especial, basta ter duas fontes e duas tochas para soldagem MIG/MAG ou uma tocha dedicada. Na Fig. 2.2 estão apresentadas algumas das possíveis configurações de tochas para soldagem MIG/MAG DA. Podem ser utilizadas duas tochas MIG/MAG convencionais, como, por exemplo, fizeram Motta (2002) e Pessoa (2007). Nessa configuração, o ângulo entre as tochas e a distância entre os arames são de fácil regulagem. A desvantagem desse sistema é a necessidade de se desenvolver um suporte especial e a dificuldade de acesso em juntas estreitas e complexas. Uma tocha única com dois bicos de contato separados minimiza as desvantagens do sistema com duas tochas, porém ainda persiste a dificuldade no ajuste de espaçamento e ângulo entre os eletrodos.



Figura 2.2 - Tipos de configurações de tochas para soldagem MIG/MAG Duplo Arame em a) duas tochas convencionais fixadas num suporte; b) tochas com potencial isolado (PESSOA, 2007; HACKL, 1999; BLACKMAN, 2002)

## 2.4 - Vantagens e desvantagens do processo

### 2.4.1 - Velocidade de soldagem

A velocidade típica do processo MIG/MAG Duplo Arame é de 2 a 3 vezes maior do que a do MIG/MAG convencional. Existe uma velocidade crítica do MIG/MAG convencional que vai depender do tipo da junta, preparação, espessura de placas e etc. mas ao superar essa velocidade observa-se as descontinuidades, uma das mais típicas é a "costa de dragão", como cita Nguyen et al. (2006). Uma abordagem para se aumentar a velocidade de soldagem do MIG/MAG convencional foi descrita por Dzelnitzki (1999) que empregando uma fonte de

soldagem especial conseguiu velocidades de até 1,3 m/min na soldagem de chapas de aço carbono em junta de T (com uma garganta de 3 mm). Isso supera a velocidade de soldagem empregando fonte convencional somente de 20 a 30% o que não compensa investimento em equipamento sofisticado. Uma proposta para aumentar a velocidade de soldagem foi feita por Gratzke et al. (1992) que definiram uma relação crítica entre largura e comprimento da poça de fusão. Aumentando a relação largura/comprimento da poça de fusão pode-se eliminar a ocorrência de mordeduras e costas de dragão em altas velocidades de soldagem. Acredita-se que um alinhamento de duas fontes de calor de uma forma sequencial criaria as condições favoráveis descritas por Gratzke et al. (1992). Assim a soldagem com dois arames seria uma solução prática para se evitar a ocorrência de defeitos na soldagem com altas velocidades.

Outros autores, como Böhme et al. (1996) e Michie et al. (1999), trabalhando com o processo MIG/MAG DA, observaram que a área da poça de fusão no MIG/MAG DA é maior e, consequentemente, a pressão do jato de plasma do arco diminui o que faz possível aumentar velocidade de soldagem sem o risco de descontinuidades aparecerem. Tal fato se encontra nos trabalhos onde foi feita uma comparação entre MIG/MAG convencional e MIG/MAG Duplo Arame. Alguns exemplos estão apresentados a seguir.

Comparando MIG/MAG convencional com MIG/MAG DA na soldagem de chapas de 50 mm de espessura Purslow et al. (2009) acharam que a velocidade de soldagem aumentou em 185%. Na soldagem MIG/MAG DA com PU (potencial único) de chapas de 6.35 mm de espessura em junta de ângulo, Gonzales (1999) observou o aumento na velocidade de soldagem em 130% comparativamente ao MIG/MAG convencional. Velocidades de soldagem de 2 a 3 m/min foram atingidas na soldagem de chapas de aço de 3.2 mm de espessura com MIG/MAG DA o que supera o MIG/MAG convencional em 150%. Ueyama et al. (2005), comparando MIG/MAG DA com MIG/MAG convencional na soldagem de chapas de 10 mm de espessura em junta de T, acharam aumento em 200% na velocidade de soldagem. Além disto, Mulligan e Melton (2001), soldando juntas de topo com chapas de 10 mm e chanfros preparados em V, observaram que o número de passes necessários para enchimento completo da junta diminui de cinco para dois no caso do MIG/MAG DA.

Assim, a soldagem MIG/MAG DA apresenta um ganho significativo na velocidade de soldagem comparando com MIG/MAG convencional e devido às suas altas velocidades de soldagem e peso elevado da tocha, o processo pode ser usado somente na forma mecanizada ou automatizada.

#### *2.4.2 - Taxa de deposição*

De acordo com um dos fabricantes de equipamento para soldagem MIG/MAG DA, o processo MIG/MAG DA tem uma taxa de deposição elevada que geralmente supera 15 kg/h (de 3 a 5 vezes maior do que MIG/MAG convencional). Alguns resultados práticos justificam tal afirmação.

Purslow et al. (2009) soldando chapas de aço carbono de 50 mm de espessura na posição horizontal com MIG/MAG DA observaram o aumento da taxa de fusão em 195% (11,3 kg/h) comparando com único arame. Na soldagem de chapas de aço de alta resistência com espessura de 8 mm com MIG/MAG DA, Sterjovski et al. (2011) acharam aumento de taxa de fusão de 2,13 kg/h para 14,9 kg/h (700 % de diferença). Comparando MIG/MAG convencional com MIG/MAG DA é possível dizer que a utilização de altas densidades de corrente em combinação com quantidade duplicada de arames são os fatores responsáveis pelas elevadas taxas de fusão e velocidades de soldagem o que não seria viável na soldagem MIG/MAG com único arame onde as densidades de corrente acima de um certo nível provocam a instabilidades na transferência metálica e aparência das descontinuidades.

#### *2.4.3 - Penetração*

Utilizando o processo MIG/MAG DA é possível obter uma penetração significativamente maior do que na soldagem com MIG/MAG convencional que pode ser garantida através de uma relação de corrente arame-líder/arame-seguidor. Hackl, (1999) afirma que para garantir a fusão e penetração adequadas, o arame-líder deve possuir uma corrente média maior (de 40 a 60%) do que arame-seguidor. A função do arame-seguidor seria o preenchimento da junta e formação final do cordão de solda. De acordo com Mulligan e Melton (2002) uma outra razão pela qual observa-se maior penetração é que o metal de base fica exposto a altas temperaturas por um tempo maior, o que aumenta a mobilidade da poça líquida e facilita a troca de calor com regiões mais próximas do metal de base. Motta (2002) menciona ação similar dos arcos promovendo maior penetração. Uma penetração de 80% da espessura foi observada por Goecke et al. (2001) na soldagem de topo de chapa de 12 mm com preparação em I. Estudando o efeito da posição dos eletrodos na soldagem MIG/MAG DA, Hedegard et al. (2007) conseguiram penetração total em junta de T com chapas de 6 mm de espessura. Os autores citam que soldando com único arame seria impossível atingir

penetração total em chapas dessa espessura em um único passe. Outros autores como Sterjovski et al. (2012), soldando com MIG/MAG DA, obtiveram cordões de solda com penetração total num único passe em chapas de 5, 8, 9,5 e 11 mm de espessura, sem apresentar as descontinuidades, com ilustra a Fig. 2.3.

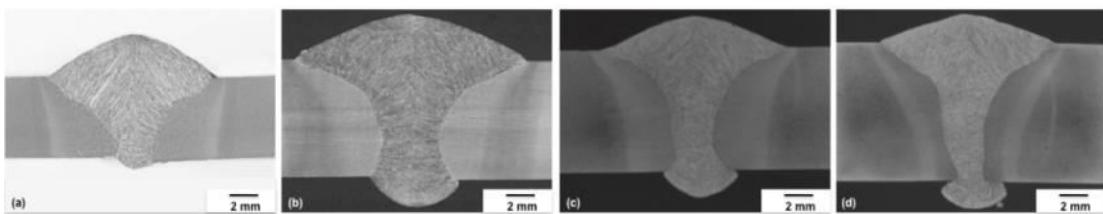


Figura 2.3 - Cordões de solda com penetração total obtidos em diferentes espessuras de chapas ((a) 5 mm, (b) 8 mm, (c) 9,5 mm e (d) 11 mm) com MIG/MAG DA (STERJOVSKI et al., 2012)

## 2.5 - Qualidade dos cordões de solda

### 2.5.1 - Presença de descontinuidades

Uma das vantagens mais mencionadas do MIG/MAG DA em termos de qualidade de solda é a eliminação de porosidade. Goecke (2001) e Michie (1999), entre outros, explicam a redução de porosidade pela ação do arco seguidor que mantém a poça de fusão aquecida por mais tempo o que facilita a degasificação. Uma área da poça de fusão maior também favorece a libertação de gases. Mas nem sempre o desempenho é o desejado. Sterjovski et al. (2010) estudaram a influência da espessura da chapa sobre a continuidade da poça de fusão na soldagem MIG/MAG DA. Relataram que na soldagem por deposição sobre chapa de 20 mm de espessura observou-se a formação de duas poças de fusão separadas para cada arame (a distância entre arames foi aproximadamente de 8 mm). A consequência dessa separação foram uma solidificação não uniforme e porosidade nos cordões de solda. Em experimento feito com as mesmas condições, mas sobre chapa de 6 mm de espessura, não houve a incidência destas descontinuidades.

No seu outro trabalho Sterjovski et al. (2012) estudaram a soldagem de chapas de aço carbono em uma junta de topo e observaram uma descontinuidade (trincas de solidificação) que não foram esperadas a aparecer no cordão de solda e que foram detectadas a uma distância de 30 mm a partir do começo da chapa através de radiografia, como ilustrado na Fig.

2.4. Os autores não esperavam a aparência de trincas, pois nem o metal de solda nem o de base tinham a susceptibilidade à trinca de solidificação. Sterjovski et al. (2012) citam que na literatura não foi encontrado os dados sobre as trincas de solidificação na soldagem MIG/MAG DA. Como um dos possíveis motivos os Sterjovski et al. (2012) sugerem que a junta teve uma geometria desfavorável o que aumenta a possibilidade de surgimento de trincas de solidificação.

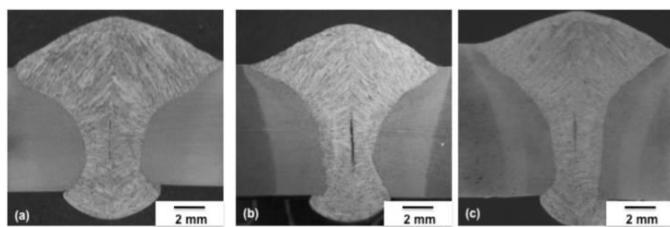


Figura 2.4 - Trincas de solidificação em cordões de solda feitos com MIG/MAG Duplo Arame: da esquerda para direita espessuras de 8, 9,5 e 11 mm (STERJOVSKI et al., 2012)

### 2.5.2 - Tensões e Deformações

Na soldagem MIG/MAG DA uma alta eficiência do calor imposto e elevadas velocidades de soldagem são responsáveis pelo baixo nível de tensões e deformações. Comparando ao desempenho do MIG/MAG DA e MIG/MAG convencional, Sterjovski et al. (2011) relataram que um nível baixo de deformações pode ser alcançado empregando DA. Fang et al. (2012) observaram que na soldagem de chapas de aço carbono com 30 mm de espessura a deformação foi menor para MIG/MAG DA (1 mm contra 2 mm para MIG/MAG convencional).

### 2.5.3 - Propriedades mecânicas da junta soldada

Fang et al. (2012) investigaram a microestrutura do cordão de solda e da Zona Afetada pelo Calor (ZAC) em juntas de topo de aço de baixa liga feitos com MIG/MAG DA e MIG/MAG convencional. Observou-se uma estrutura mais fina para juntas feitas com MIG/MAG DA e como consequência, houve um aumento do limite de resistência e da energia do impacto, como quantificam Tab. 2.1 e 2.2. Na soldagem de tubos de aços de alta resistência (690 MPa) com MIG/MAG DA, Blackman et al. (2005) também observaram aumento da tensão de ruptura em aproximadamente 120 MPa.

Tabela 2.1 - Comparação de limite de resistência dos cordões de solda feitos com MIG/MAG DA e MIG/MAG convencional (FANG et al., 2012)

Processo de soldagem	Número da solda				Média (MPa)
	1	2	3	4	
MIG/MAG DA	843	851	834	850	845
MIG/MAG convencional	816	820	812	809	814

Tabela 2.2 - Energia absorvida em ensaio de impacto na ZAC e no metal de solda a -20 °C (FANG et al., 2012)

Processo de soldagem	Metal de solda (J)			ZAC (J)			Média (J)	
	1	2	3	1	2	3	Metal de solda	ZAC
MIG/MAG DA	140	135	150	230	217	201	141	216
MIG/MAG convencional	123	119	109	211	167	150	117	176

## 2.6 - Influência de variáveis do MIG/MAG DA sobre a estabilidade e formação do cordão de solda

### 2.6.1 - Espaçamento e ângulo entre os eletrodos

Estudando a influência da distância e ângulo entre os eletrodos sobre a formação do cordão de solda, Hedegård et al. (2004) avaliaram cinco combinações (Fig. 2.5) nas condições de soldagem em juntas de topo, de ângulo e sobreposta. Fizeram testes com chapas de aço ao carbono e alumínio, com espessuras variando de 2 a 12 mm. Foi observado que, ao se aumentar a distância entre os eletrodos (mantendo-se os outros parâmetros constantes), a faixa de parâmetros adequados aumenta. Com configuração da tocha A, observou-se diminuição da deflexão magnética e redução de quantidade de respingos comparando com a configuração E. Além disto, os autores citam que se for usada a configuração A não há necessidade de sincronização para os dois arcos trabalhando em modo operacional pulsado. Por outro lado uma distância entre os eletrodos maior do que 20 mm pode causar a formação de duas poças de fusão separadas e consequentes descontinuidades. Ainda segundo Hedegard et al. (2004) a configuração A é a que proporciona a maior penetração do cordão de solda (comparando com configuração C).

Ueyama et al. (2005) também fizeram uma avaliação da influência de distância entre os eletrodos sobre a formação do cordão de solda, através de deposição dos cordões de solda sobre a chapa de aço carbono. Mantendo-se a distância entre os eletrodos em 12 mm, os autores observaram que quando arame seguidor foi inclinado em 9° empurrando, Fig. 2.6 tipo 3, a velocidade de soldagem alcançada foi de 3 m/min com cordão de solda aceitável, fato não

conseguido com arames paralelos e a mesma velocidade de soldagem.

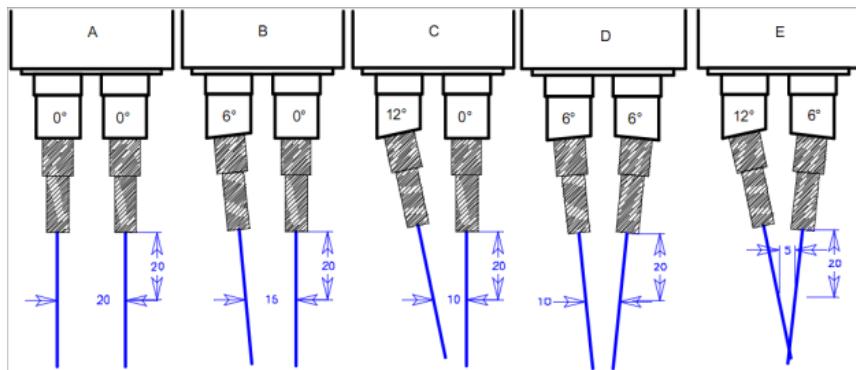


Figura 2.5 - Combinações de distância e inclinação dos eletrodos avaliadas por (HEDEGARD et al., 2004)

Em trabalho do Ueyama et al. (2005) os melhores resultados foram alcançados com a combinação onde o arame-seguidor estava inclinado em 9° sentido empurrando, independente da inclinação do arame-líder (Fig. 2.6, tipo 3 e 4).

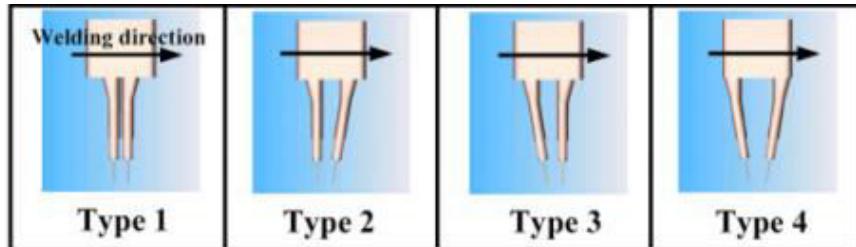


Figura 2.6 - Variação de ângulo e da distância entre os eletrodos avaliadas por (UEYAMA et al., 2005)

O efeito da distância foi avaliado por Ueyama et al. (2005) com os dois arames inclinados em 9°, um contra o outro, como ilustra a Fig. 2.6, tipo 4. A distância entre os arames foi variada de 5 a 20 mm. Para a distância de 5 mm, a velocidade de soldagem foi de 2 m/min com tendência de crescer com o aumento da distância (de 9 a 12 mm). Ao contrário dos resultados de Hedegård et al. (2004), para uma distância de 20 mm a aparência do cordão ficou inaceitável. Assim, segundo os autores, os melhores resultados foram obtidos para distâncias entre arames-eletrodo de 9 a 12 mm e arame-seguidor inclinado em 9° no sentido empurrando. Yudodibroto et al. (2006) avaliaram a influência do ângulo de inclinação do arame-líder sobre a formação do cordão de solda. Soldou-se cordões sobre chapa de aço

carbono de 6 mm de espessura. Para uma distância bico de contato-peça de 20 mm, o espaçamento entre os arames foi de 6 mm. A uma velocidade de soldagem de 1,5 m/min e variando-se o ângulo do arame-líder entre 0 e 20º empurrando, observou que quando o ângulo do arame-líder foi de 0º aparecia na formabilidade do cordão "costas do dragão". Já para o eletrodo inclinado em 20º, a costa de dragão não foi observada.

Ueyama et al. (2006) estudaram a influência da distância entre eletrodos posicionados um atrás do outro sobre a formação do cordão de solda. Variou-se a distância de 8 a 30 mm, mantendo um ângulo de 20º entre os eletrodos. Os autores verificaram que quando a distância era de 8 mm a poça de fusão sofreu instabilidades e flutuações. Já Motta (2002), fazendo revestimento e utilizando corrente pulsada em ambos os arames, posicionados lado a lado, observou que tochas separadas com ângulos maiores favorecem a formação dos cordões com maior diluição e perfil de penetração uniforme (penetração no centro é igual a das laterais). Para uma mesma corrente média, o aumento da distância entre os eletrodos favoreceu a formação de cordões largos e com perfil de "penetração dupla". De forma similar à Motta, Ueyama et al. (2006) observaram que ao se aumentar a distância entre os arames a penetração no centro do cordão de solda tende a diminuir. Para uma distância de 30 mm começa se formar duas poças de fusão separadas para cada arame.

Além de estudar a influência da distância e ângulo entre os eletrodos sobre a formação do cordão de solda, Ueyama et al., (2006) estudaram a influência da distância entre eletrodos sobre as interrupções entre arcos durante soldagem. Como critério de estabilidade, os autores usaram o número de picos anormais de tensão durante a soldagem. Ausência de picos foi observada quando a distância entre arames era de 5 mm. A maior instabilidade aconteceu quando a distância foi de 10 mm. A uma distância de 20 mm foram observados resultados intermediários, indicando a presença de um número de picos elevado no arame-seguidor. Os autores explicam os fenômenos observados pela variação da força magnética quando se altera a distância entre os arames. Reis et al. (2010) observaram menor interrupção dos arcos e menos picos anormais de tensão quando a distância entre eletrodos foi menor do que 15 mm. A quantidade máxima de interrupções e picos de tensão foi observada para uma distância de 20 mm, como ilustrado na Fig. 2.7.

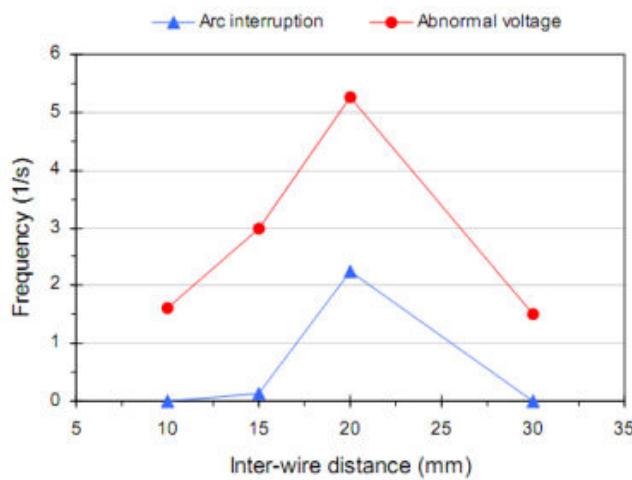


Figura 2.7 - Relação da distância entre os arames e a quantidade de interrupções (REIS et al., 2010)

Apesar de discordâncias entre os autores no tocante de influência da distância e do ângulo entre os eletrodos sobre a formação do cordão de solda e sobre estabilidade do processo, pode observar que uma distância de 8 a 15 mm favorece a formação de cordões de solda com boa aparência visual sem necessidade de empregar a sincronização entre as fontes (caso se utilizar pulsado nos ambos os arames). Deste modo ainda percebe-se uma falta de conhecimento em relação à influência da distância e do ângulo entre os eletrodos sobre a formação do cordão de solda ao se usar MIG/MAG DA.

#### 2.6.2 - Distância Bico de Contato-Peça

Acredita-se que a variação da distância bico de contato-peça (DBCP) na soldagem MIG/MAG DA tenha a mesma influência de que na MIG/MAG convencional. No seu estudo de influência do aumento da distância bico de contato-peça sobre a estabilidade do processo MIG/MAG operando em curto-círcuito Souza e Scotti (2009) afirmam que o aumento da DBCP alarga a faixa de tensão de curto-círcuito estável, mas essa faixa possui valores de tensão mais baixos. Os autores concluíram que aumento da DBCP provoca uma diminuição de corrente média para uma mesma velocidade de alimentação do arame-eletrodo. Os dados obtidos por Souza e Scotti (2009) estão em boa concordância com os do Ferreira e Ferraresi (2010) que avaliaram a influência da composição química do gás de proteção e da DBCP sobre a transferência metálica na soldagem MIG de aço inoxidável com um único arame, usando-se uma fonte do tipo "tensão constante". Os autores acharam que aumento da DBCP

diminui a corrente de soldagem enquanto todos os parâmetros foram mantidos constantes.

Independente da mistura gasosa com o aumento da DBCP a corrente média diminui, uma vez que o comprimento livre do eletrodo aumenta e, como consequência, tem-se uma queda de tensão maior, reduzindo o comprimento do arco para compensar. Nesse caso, pode-se obter taxas de fusão maiores com correntes menores.

Uma outra visão sobre a influência da variação da DBCP na soldagem MIG/MAG DA foi dada por Sterjovski et al. (2010). De acordo com os autores, com aumento da DBCP a queda de tensão cresça também (já que normalmente se usa fontes do tipo corrente constante, para se fazer pulsação), o que reduz a probabilidade de ocorrência de defeitos, tais como trinca por H<sub>2</sub>. Os autores explicam a redução de dúvida de se obter as trincas por H<sub>2</sub> pelo aumento de tensão e consequente aumento de zona aquecida por efeito Joule o que favorece a degasificação. Vale ressaltar que em tochas para DA com eletrodos inclinados, a variação da DBCP provoca mudança na distância entre os eletrodos. Isso pode alterar a interação magnética entre os arcos durante a soldagem podendo provocar a ocorrência de uma transferência metálica instável, como observado por Sterjovski et al. (2010). Deste modo similar a soldagem MIG/MAG convencional na MIG/MAG DA procura-se a DBCP máxima possível para se obter maiores taxas de fusão. Entretanto, como recomendam Scotti e Ponomarev (2008), devido às altas correntes em soldagem MIG/MAG DA a DBCP não deve superar 25 mm (amolecimento excessivo do arame-eletrodo por aquecimento por efeito Joule).

## 2.7 - Consumíveis

### 2.7.1 - Metal de adição

Com soldagem MIG/MAG DA potencial isolado é possível utilizar diversas combinações de tipos e diâmetros dos arames-eletrodo. A maioria dos trabalhos relacionados à soldagem com MIG/MAG DA foram feitos utilizando-se arames maciços com diâmetros iguais. Porém, acontece que em certas aplicações utilizam-se diâmetros e tipos dos arames diferentes. Por exemplo, Hedegard et al. (2004) usaram arames maciços da mesma classe, mas o arame-líder com diâmetro de 1.2 mm e o arame-seguidor de 1.0 mm. Combinando arames de diâmetros diferentes pode-se obter uma variação da taxa de fusão em cada arame para uma mesma corrente. Outro pesquisador, Ketron (2000), usou uma combinação de arame maciço

com arame tubular para soldagem de chapas finas com superfície oxidada. Obteve-se os resultados aceitáveis sem inclusões de escória e porosidades. O autor conclui que os componentes da composição química do arame tubular favorecem o refino dos óxidos presentes na chapa.

### 2.7.2 - Gás de proteção

A função principal de um gás de proteção é limitar/eliminar a ação da atmosfera sobre a poça de fusão. Outras funções (estabilizar o arco, definir transferência metálica, etc.) são secundárias. Entretanto existem afirmações de que a composição química do gás de proteção pode ter uma grande influência sobre a taxa de fusão do arame eletrodo.

De maneira análoga a MIG/MAG convencional, na soldagem MIG/MAG DA utiliza-se como proteção gases ativos, inertes ou mistura dos ambos. Acredita-se que o efeito do gás de proteção na soldagem DA é similar a do na soldagem com arame único. Porém, um dos fabricantes de misturas gasosas apresentou uma mistura composta pelo quatro componentes 65%Ar+26,5%He+8%CO<sub>2</sub>+0,5%O<sub>2</sub> que, segundo Curch e Imaizumi (1990), aumenta a taxa de deposição na soldagem com único arame para até 27 kg/h. Suban e Tusek (2001) em seu estudo da influência do gás de proteção sobre a taxa de fusão do arame provaram que a composição química do gás de proteção não é uma variável determinante sobre a taxa de fusão do arame e que a mesma é governada principalmente pelo valor da corrente de soldagem. Além disso Suban e Tusek (2001) usando a mistura apresentada por Curch e Imaizumi (1990) chegaram à conclusão que independente da composição química do gás de proteção a taxa de fusão aumenta com aumento da corrente de soldagem e do comprimento livre do arame.

Por outro lado, a composição do gás de proteção tem uma grande influência sobre tipo da transferência metálica. Resende et al. (2010) estudaram a influência da composição química do gás de proteção à base de Ar com adição de CO<sub>2</sub> e O<sub>2</sub> sobre a corrente de transição e estabilidade do processo para soldagem com arame da classe ER70S-6. Os autores acharam que ao se aumentar o teor de CO<sub>2</sub> em mistura Ar+CO<sub>2</sub> a corrente de transição globular-goticular aumenta. Acima de 35% de CO<sub>2</sub> a transição do modo de transferência metálica não foi observada. Para mistura Ar + O<sub>2</sub>, com aumento do teor do O<sub>2</sub> a corrente de transição cai. Ao superar 5% de O<sub>2</sub> a corrente de transição tem a tendência de crescer. De modo geral os autores concluíram, que quando a corrente é próxima da a de transição (mas

não é maior) com aumento de teor de CO<sub>2</sub> a repulsão e distorção da gota fica mais evidente, prejudicando a estabilidade e gerando respingos.

Groetelaars e Scotti (2007) estudando a influência do teor de CO<sub>2</sub> na transferência metálica em soldagem MIG/MAG DA com PU obterem resultados similares à Resende et al. (2010) (com aumento do teor de CO<sub>2</sub> a corrente de transição sobe). Com altos teores de CO<sub>2</sub> devido à proximidade dos arames, as gotas se juntam e não foi possível obter a transferência metálica exclusivamente globular ou goticular o que resultou em respingos e instabilidades.

Em relação à qualidade do cordão de solda, Ebrahimnia et al. (2009) citam que para aço carbono a quantidade de micro poros e inclusões diminuem com aumento do teor de CO<sub>2</sub>; um teor elevado de CO<sub>2</sub> em misturas com base de Ar pode ser favorável no aumento da penetração. Porém Ueyama et al. (2006) estudando a influência do teor de CO<sub>2</sub> sobre a estabilidade em MIG/MAG DA e afirmaram que com 10% para cima de CO<sub>2</sub> o número de picos anormais de tensão aumenta (distância entre os arames era de 10 mm). Isso poderia acontecer por que segundo os Zielinska et al. (2008) com aumento do teor de CO<sub>2</sub> a tensão do arco cresce. Para uma tensão maior o comprimento do arco também é maior o que pode causar interrupções nos arcos, descritos por Ueyama et al. (2006). Vale ressaltar que para soldagem com dois arames a vazão do gás de proteção pode ser significativamente maior devido o número dobro dos arcos a serem protegidos e aumento do diâmetro do bocal de proteção.

## 2.8 - Modos operacionais de corrente em cada arame

Tradicionalmente, na soldagem MIG/MAG DA com potencial isolado utiliza-se a corrente constante em ambos os arames, corrente constante com pulsação (pulsado) ou combinação de dois modos operacionais diferentes. Acredita-se que na soldagem MIG/MAG Duplo Arame com potencial isolado os parâmetros e modos operacionais de corrente para cada arame podem ser ajustados de uma forma independente.

Encontram-se vários trabalhos que abordam o uso da corrente pulsada na soldagem MIG/MAG DA, tais como Blackman et al. (2002), Yudodibroto et al. (2006), Andersson et al. (2006). Em todos os trabalhos citados, os autores utilizaram a corrente pulsada em ambos os arames com uma sincronização entre corrente de pico no arame líder e corrente de base no arame seguidor. Para garantir essa sincronização, usa-se um módulo especial que permite a conexão entre as fontes, de forma que uma comande a outra como sendo "líder" e "seguidor".

Fabricantes de equipamento convencem os usuários que o uso da sincronização é indispensável para se obter uma boa estabilidade do processo e bom acabamento do cordão de solda. Porém, no meio científico existe discordâncias entre pesquisadores e usuários sobre o emprego da sincronização na soldagem MIG/MAG Duplo Arame com pulsado em ambos os arames. Por exemplo, Motta e Dutra (2001) afirmam que:

- defasagem entre os pulsos reduz a deflexão magnética entre os arcos ao se soldar com correntes baixas;
- defasagem não influencia significativamente as características geométricas dos cordões de solda.

Andersson et al. (2006) estudaram o efeito da defasagem e o espaçamento entre eletrodos na soldagem MIG/MAG DA com corrente pulsada e afirmaram que:

- a defasagem pode ser utilizada para diminuir interação magnética entre os arcos e eliminar geração de respingos quando a distância entre os eletrodos foi de 8 a 11 mm;
- acima de 12 a 15 mm não foi observada a interação magnética entre os arcos (defasagem pode ser omitida);
- para distâncias pequenas entre eletrodos, o mais importante é a presença de defasagem do que o seu tipo (em fase, fora de fase etc.)

Em outro trabalho, Motta et al. (2005) estudaram a influência do tipo da defasagem (corrente de picos defasados ou em fase) e tempo de defasagem sobre a geometria do cordão de solda em revestimentos. Resultados obtidos no tocante à influência da defasagem sobre a interação magnética estão em concordância com os resultados obtidos por Andersson et al. (2006). Outros aspectos que foram observados por Motta et al. (2005):

- defasagem não é necessariamente melhor para a formação do cordão de solda, produzindo cordões com penetração dupla e pouco reforço;
- ao contrário de Andersson et al. (2006), os autores não observaram a influência da defasagem na geração de respingos;
- com aumento do tempo de defasagem, o sopro magnético diminui a sua intensidade, porém não foi possível evitá-lo completamente;
- ao contrário de Ueyama et al. (2009), a defasagem não influencia sobre a estabilidade

- do processo em termos de quantidade de picos anormais de tensão e interrupções nos arcos;
- o efeito da defasagem em corrente maior do que a de transição é desprezível; um tempo de defasagem maior do que o tempo de pulso apresentou cordões mais largos e com penetração menor no centro do cordão.

Reis et al. (2012) no seu estudo de deflexão magnética dos arcos na soldagem TIG, observaram que a resistência do arco à extinção aumenta com o aumento da corrente. Este fenômeno pode contribuir na resistência do arco a desvios devido a interação magnética. Os resultados obtidos por Reis et al. (2012) estão em concordância com os de Ueyama et al. (2006) que observaram um aumento da estabilidade do arco-seguidor com aumento da corrente de base na soldagem MIG/MAG DA com corrente Pulsada em ambos os arames. O uso da defasagem é justificado quando os arcos de dois arames estão pulsando em correntes inferiores (por exemplo arco-líder está em 350 A no pulso e arco-seguidor em 150 A no base). Nesse caso a defasagem reduz a interação magnética. Mas se, por exemplo a corrente de pulso do arame-líder é 450 A e corrente de base do arame-seguidor é 300 A a defasagem não terá tal efeito, pois ambas as correntes estão altas.

Assim, corroborando Scotti et al. (2006), na soldagem MIG/MAG duplo arame podem ser usados fontes convencionais, portanto sem defasagem, ao invés de fontes sofisticadas com sistemas complexos de sincronização, o que além de reduzir significativamente o custo de equipamento também facilita a busca dos parâmetros adequados.

No sentido de aproveitar os benefícios de se usar o MIG/MAG DA com Potencial Isolado, Staufer (2012) combinou vários modos operacionais de corrente, com indicado pela Tab. 2.3.

Tabela 2.3 - Combinações de modos operacionais de corrente avaliadas por (STAUFER 2012)

Variáveis do CMT Twin para aço	CMT-Twin Speed	CMT- Twin Heavy Duty	CMT-Twin Root	CMT-Twin CO <sub>2</sub>	CMT-Twin Cladding
Arame-Líder	Puls	Puls	CMT	CMT	CMT
Arame-seguidor	CMT	CMT	CMT	CMT	CMT
Características/aplicação	Altas velocidades	Espessura grande	Passe de raiz	100% CO <sub>2</sub>	Revestimento

Aplicando a combinação CMT-Twin Cladding, Staufer (2012) conseguiu bons resultados em revestimentos com diluição reduzida em até 10 vezes comparado com o MIG/MAG convencional. A característica principal da combinação CMT TwinSpeed (Tab. 2.3) é o aumento da velocidade de soldagem em até 4 m/min na união de chapas de 2 mm de espessura com cordões de qualidade aceitável. As combinações avaliadas apresentaram alta estabilidade sem aplicação de qualquer tipo de sincronização.

## 2.9 - O uso de corrente na polaridade negativa

No passado recente, acreditava-se que o uso da polaridade negativa na soldagem MIG/MAG seria um destino sem perspectiva, apesar dos seus benefícios comparando com polaridade positiva (aumento da taxa de fusão para uma mesma corrente). Talkington (1998), por exemplo, citou que uso da polaridade negativa é limitado pela transferência metálica globular repelida. Recentemente, Souza et al. (2010) estudaram a influência da polaridade sobre a taxa de fusão em soldagem MIG/MAG com único arame. Os autores afirmaram que o tipo da transferência metálica em MIG/MAG CC- fortemente depende da composição química do gás de proteção e não é necessariamente limitada somente pelo modo globular repelida (os autores conseguiram obter globular e goticular). Outro aspecto é a geometria do cordão que, de acordo com Lancaster (1986), tem uma baixa penetração e alta convexidade. Novamente, Souza et al. (2010) verificaram que a penetração em CC- pode ser até 60% da CC+ e que a penetração também é governada pelo tipo de gás de proteção. Outra técnica de soldagem MIG/MAG com polaridade negativa foi desenvolvida por Kataoka et al. (2007). Os autores propuseram usar arame-eletrodo dopado com elementos da terra rara que iriam estabilizar o arco e garantir uma alta taxa de fusão e penetração adequadas. Essa técnica não encontrou muita aplicação devido ao custo elevado dos consumíveis. Uma outra técnica de se soldar com polaridade negativa em MIG/MAG foi desenvolvida por Era et al. (2013) que empregaram um modo de controle da transferência metálica por curto-círcuito denominado CBT (Controlled Bridge Transfer). Os autores empregaram esta técnica na união de chapas finas em junta sobreposta, como ilustra a Fig. 2.8, e concluíram que se usado a CBT com polaridade negativa foi possível soldar juntas com elevada abertura na raiz e com intolerâncias na preparação.

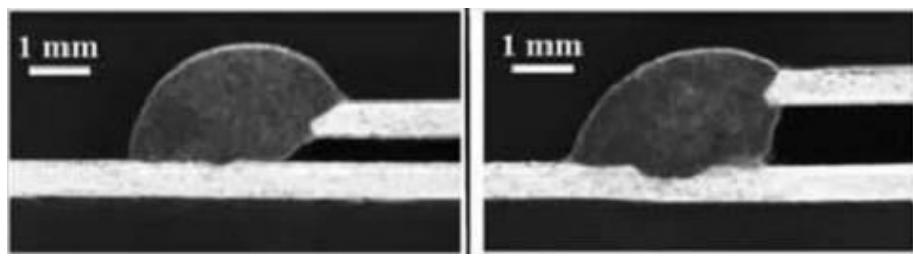


Figura 2.8 - Chapas soldadas em junta sobreposta com técnica CBT CC- (ERA et al., 2013)

Um modo de combinar os benefícios de CC+ e CC- no MIG/MAG é soldagem com corrente alternada, também denominada como MIG/MAG CA. Um dos primeiros trabalhos sobre a soldagem com polaridade variável foi o do Talkington (1998). Esse autor observou que com aumento da % da polaridade negativa a penetração diminui. Na sua comparação de MIG/MAG CC+ e MIG/MAG corrente pulsada polaridade positiva com MIG/MAG CA, Faria et al. (2007) observaram que com aumento da % de CC- a penetração diminui e o reforço aumenta. Os autores afirmaram que o MIG/MAG CA produz cordões com baixa penetração, alto reforço e maior taxa de fusão, quando comparando com pulsado CC+ para a mesma corrente eficaz. Cordões com grande reforço e baixa penetração combinando com elevada taxa de fusão podem ser aproveitados na soldagem de chapas finas com juntas sobrepostas de baixa tolerância de preparação, como afirmam Tong et al. (2001).

Neste sentido Pessoa (2007) avaliou o processo MIG/MAG DA com um arame trabalhando em modo operacional “corrente alternada”. O autor constatou que a aplicação de CA promoveu a redução da largura da solda e diminuição da diluição, quando comparado com corrente contínua pulsada e que a condição com corrente alternada resulta em maior reforço e menor penetração.

## 2.10 - Soldagem fora da posição plana

Considerando a necessidade de soldagem em varias posições, a corrente mais elevada é uma limitação natural. Os modos de transferência metálica controlável (Pulsado e Curto Circuito Controlado, por exemplo) garantem a transferência metálica estável em baixos níveis de corrente média e facilitam a soldagem fora de posição. Purslow et al. (2009) soldando chapas de 25 e 50 mm de espessura em posições horizontal, vertical e sobrecabeça empregaram MIG/MAG DA com corrente pulsada em ambos os arames, observando alta estabilidade e controle do processo. Staufer (2012) soldou chapas finas em posição vertical usando DA com arme-líder trabalhando em modo Pulsado e arame seguidor em CMT (*Cold*

*Metal Transfer)* observando alta estabilidade da combinação dos modos operacionais.

## 2.11 - Aplicações industriais

O maior campo de aplicação do MIG/MAG DA é na soldagem com elevada velocidade de peças, feitas de aço carbono e de aço baixa liga. Encontra-se também aplicações em soldagem de Al e aço inoxidável, como citam Hackl (1999) e Hedegard et al. (2004).

Como exemplo de aplicações, tem-se:

- soldagem de rodas de carro feitas de Al de 2,3 mm de espessura, a uma velocidade de soldagem 2 m/min;
- soldagem de eixos de carga para indústria automotiva feito de aço carbono com espessura de 2 mm, a uma velocidade de soldagem de 4 m/min (STAUFER, 2012);
- soldagem de dutos de aço X100 de 1220 mm de diâmetro (BLACKMAN et al., 2005);
- soldagem de tanque de combustível de 2 mm de espessura com um acréscimo na velocidade de soldagem de 236%, comparando com arame único (BERGE, 2001);
- soldagem de conversor catalítico de aço inoxidável de 1 mm de espessura, com aumento da velocidade de soldagem em 241% (BERGE, 2001);
- soldagem na indústria naval de chapas de aço carbono de 4 mm de espessura em juntas de filete com velocidade de até 1,7m/min (TROMMER, 2009);
- soldagem de juntas sobrepostas em vaso de pressão, com velocidade de soldagem de 1 4 m/min (MOTTA; DUTRA, 2001);
- soldagem de painéis de Al com espessura de 6 à 10 mm, em indústria naval com MIG DA com velocidade de soldagem de 95 a 85 cm/min;
- soldagem de cilindros de alumínio de 2 mm de espessura com MIG/MAG Tandem e velocidade de soldagem atingida de 6 m/min (HARRIS, 2001);
- soldagem de revestimento de AWS 317L depositados por GMAW Duplo Arame em aço ASTM A 516 Gr 60 para uso na indústria do petróleo.

Segundo os fabricantes de equipamentos e trabalhos publicados a soldagem com duplo arame trás os seguintes benefícios:

- aumento da velocidade de soldagem de 1,5 à 4 m/min (dependendo do material,

espessura e tipo de preparação de junta);

- taxas de fusão elevadas (até 24 kg/h);
- qualidade de cordões maior (menos porosidade) com propriedades mecânicas elevadas;
- baixa deformação após soldagem.

Devido ao isolamento elétrico entre os bicos de contato, pode-se usar arames de diferentes tipos e diâmetros (maciço e tubular, por exemplo) e também diferentes tipos de modos operacionais de corrente. Porém tal abordagem complica o processo de parametrização, comparado com MIG/MAG convencional. Recentemente apareceram combinações de vários modos operacionais de corrente de arame-líder e arame-seguidor (Pulsado-CMT, Pulsado-Pulsado, Pulsado-CA) que trouxeram benefícios em termos de soldagem multiposicional e soldagem de chapas finas. Porém na literatura atual não se encontra muitas pesquisas relacionadas à exploração do uso dessas novas técnicas e potencialidades de sua aplicação. Também na literatura atual não se encontrou os dados sobre o uso da polaridade negativa pura na soldagem com Duplo Arame, como, por exemplo, corrente constante ou outros modos operacionais com polaridade negativa (CC-). Isso motiva levantar uma pesquisa para entender as potencialidades de uso da polaridade negativa e sua combinação com os outros modos operacionais na soldagem MIG/MAG Duplo Arame com intuito de aumentar as taxas de fusão e velocidades de soldagem.

## CAPITULO III

### METODOLOGIA, INSUMOS E EQUIPAMENTOS

#### 3.1 - Metodologia

Tomou-se como premissa básica que na soldagem a arco de passes de enchimento almejam-se duas características:

- volume de metal adequado (não muito grande, para evitar altas tensões térmicas, nem muito pequeno, para não demandar um grande número de passes e seus respectivos tempos mortos);
- mínima fusão entre os passes e nas laterais da junta.

No caso da soldagem MIG/MAG, para cumprir as duas características geralmente usa-se corrente na polaridade positiva (seja corrente constante, pulsada ou outros modos operacionais). Porém na soldagem MIG/MAG DA geralmente se dar a preferência para corrente pulsada com sincronização. Esta combinação já foi bastante discutida e avaliada na literatura e pode ser caracterizada como uma combinação flexível e estável. De acordo com Scotti et al. (2006), especialmente em baixos níveis de corrente (como a ser usado neste trabalho) a sincronização "fora de fase" reduz a interação magnética entre os arcos e estabiliza o processo de soldagem. Essa forma de sincronização está apresentada esquematicamente na Fig. 3.1, e é feita através de uma conexão dedicada entre as fontes, para que uma comande a outra. Foi escolhido um atraso de 5,8 ms para que o período de pulso da fonte seguidor ocorresse no meio do tempo de base da fonte líder.

Assim, do ponto de vista metodológico, para se alcançar o objetivo do trabalho, serão feitas soldagens comparativas entre o modo operacional pulsado, nos dois arames com sincronização entre as fontes, e modos operacionais em polaridade negativa. Considerando que seria mais sensível se trocar o modo operacional em apenas um arame, optou-se por substituir o modo pulsado apenas no arame seguidor. Para se avaliar a polaridade negativa, serão testados dois modos operacionais, cujos usos ainda não foram reportados na literatura para esta aplicação, ou seja, operando em curto-círcuito controlado (CCC) em polaridade negativa ou em pulsado em polaridade negativa, como resumindo na Tab. 3.1. Acredita-se, que utilizando uma combinação de polaridades positiva e negativa é possível aliar a maior penetração típica da polaridade positiva (arame-líder) com o potencial aumento da taxa de fusão da polaridade negativa (arame-seguidor). Os fenômenos que governam a taxa de fusão e o formato do cordão de solda em função da polaridade podem ser encontrados em Scotti e Ponomarev (2008) e Souza et al. (2010). No caso da polaridade negativa, a sincronização entre os pulsos da corrente do arame líder e os parâmetros do arame seguidor não será utilizada.

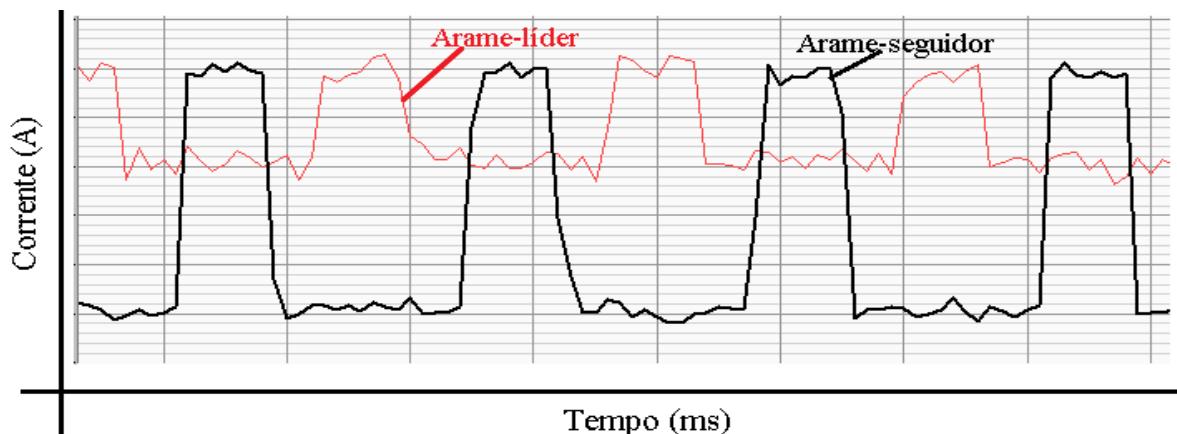


Figura 3.1 - Ilustração da sincronização entre as fontes de soldagem para se trabalhar com os modos pulsado-pulsado de forma defasada em soldagem MIG/MAG Duplo Arame

Tabela 3.1 - Combinações dos modos operacionais para os arames líder e seguidor e respectiva representação proposta neste trabalho

Combinação de Modo operacional de corrente	Polaridade de corrente		Representação
	Líder	Seguidor	
Pulsado CC+&Pulsado CC+	CC+	CC+	Pulsado(+) - Pulsado(+)
Pulsado CC+&Pulsado CC-	CC+	CC-	Pulsado(+) - Pulsado(-)
Pulsado CC+&CCC CC-	CC+	CC-	Pulsado(+) - CCC(-)

Para tornar a comparação menos restrita, a mesma será feita em condições diferenciadas, a saber:

- soldagem de um único passe de enchimento na posição plana em chapa chanfrada, com passe de raiz concluído;
- soldagem de passes de enchimento em múltiplos passes (multipasse) numa junta de topo com passe de raiz concluído;
- soldagem de um único passe na posição plana em junta sobreposta de chapas finas;
- soldagem de um único passe de enchimento na posição sobrecabeça em chapa chanfrada com passe de raiz concluído.

Para cada condição de soldagem será feita a mesma placa de teste. Os detalhes do formato de chanfro e as dimensões de placas de teste serão apresentados nos respectivos capítulos. Para se fazer a comparação, utilizar-se-á a mesma corrente média em cada arame ( $\leq 280$  A no líder e  $\leq 180$  A no seguidor), mesmo a custa de diferentes taxas de deposição. Para compensar a diferença de taxas de deposição um outro parâmetro de comparação será implementado isto é a mesma quantidade de metal depositado por comprimento do cordão de solda. Para isto a velocidades de soldagem e, consequentemente, energias de soldagem, tornem-se diferentes mas os cordões de solda fiquem iguais. A justificativa para tal abordagem é que numa soldagem típica de duplo arame o que se procura é produção, que pode ser traduzida em volume de material depositado (taxas de deposição) por unidade de comprimento de solda. Para tal, será procurado manter a quantidade de metal depositando constante dentro de cada condição de soldagem. Embora sendo as correntes médias relativamente baixas para soldagem MIG/MAG Duplo Arame, as mesmas pareceram adequadas para soldagens fora da posição plana, como pensado para algumas aplicações.

A velocidade de alimentação de cada arame será ajustada até se obter um comprimento do arco curto (2 a 3 mm) para a corrente média desejada. O comprimento do arco mais curto possível é importante, pois na soldagem com dois arames pode reduzir o desvio magnético.

Também do ponto de vista comparativo, para efetuar esta avaliação serão mantidos constantes os seguintes parâmetros:

- Mesmo material e diâmetro do consumível;
- Mesma composição química do gás de proteção;

- Mesma distância bico de contato peça (DBCP), de 21 mm (a DBCP seria a distância entre a ponta do bico de contato e o fundo do chanfro, Fig. 3.2);
- Quantidade de metal depositado;
- Mesma distância entre arames (em função da tocha de soldagem, ver Item 3.3);
- Mesmo material da placa de teste (a geometria de placa de teste é diferente para cada condição de comparação);
- Mesma geometria do chanfro dentro de cada condição de comparação.

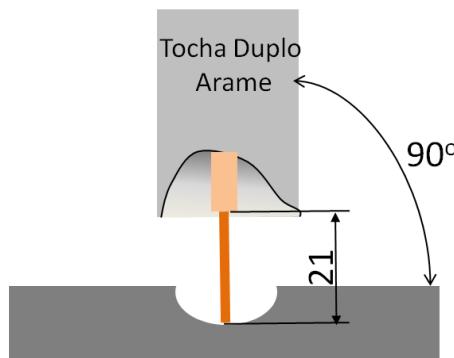


Figura 3.2 - Esquematização de medição da distância bico de contato-peça

A discussão dos resultados será feita baseando-se na análise dos seguintes parâmetros: aspecto superficial do cordão (avaliação qualitativa); a geometria do cordão de solda (em relação à penetração, área da zona afetada pelo calor, índice de convexidade do cordão de solda, área da zona fundida); e aspecto econômico (em relação à geração de respingo e velocidade de soldagem para se fazer a mesma junta). Além disto, será feito um envelope operacional para cada técnica separadamente, visando apresentar os resultados em termos de velocidade de soldagem alcançável e limite. Como velocidade limite, considerar-se-á uma velocidade de soldagem em que o cordão não apresente defeitos graves (costa de dragão ou mordeduras), mas já dá para perceber que se aumentar mais a mesma o cordão vai ficar inaceitável. A velocidade alcançável seria uma velocidade de soldagem quando o cordão de solda apresenta alta irregularidade e tem descontinuidades percebidas ao olho nu. Para aceitação dos cordões de solda, estabeleceram-se critérios. No primeiro, um cordão de solda é aprovado quando não apresenta mordeduras prolongadas maiores do que 10 mm e com profundidade maior do que 1 mm. Pelo segundo critério, o cordão de solda não deve apresentar porosidade na sua superfície e nas suas seções transversais. Finalmente, um terceiro critério foi de que os cordões de solda não devam apresentar falta de fusão entre os

passes e paredes do chanfro, observados em análise das seções transversais.

Quanto aos ensaios metalográficos, a penetração, área da zona afetada pelo calor (ZAC), índice de convexidade e área da zona fundida serão medidos de acordo com o esquema da Fig. 3.3

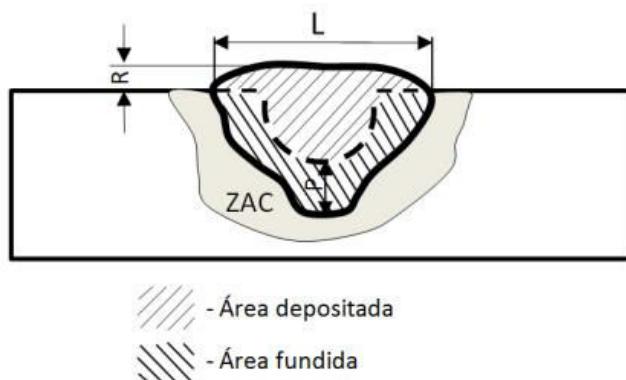


Figura 3.3 - Apresentação do esquema de medição de parâmetros geométricos do cordão de solda com detalhe em: ZAC = zona afetada pelo calor, P = penetração, R = reforço e L = largura

Para se fazer uma avaliação econômica, as placas de teste foram pesadas antes de soldagem e após (removendo os respingos) obtendo assim a quantidade de metal efetivamente depositado. Comparando o peso obtido com peso do arame fundido obter-se-á a quantidade de respingos.

### 3.2 - Insumos

As placas de teste para soldagem foram feitos com barras chatas de aço carbono ABNT 1020. As dimensões (espessura, largura) e preparação das placas de teste serão descritas nos respectivos capítulos para cada condição de soldagem, separadamente.

No seu trabalho Palani e Murugan (2006) afirmam que para se obter uma transferência metálica em voo livre, especialmente com corrente pulsada, uma combinação específica de arame-gás de proteção deve ser empregada. Por exemplo, ao se combinar arame eletrodo da classe AWS ER70S-6 com CO<sub>2</sub> puro não se consegue obter o modo goticular, porém o mesmo arame combinado com Ar puro já daria certo. Como citado por Palani e Murugan (2006), misturas de Ar com até 18% de CO<sub>2</sub> seriam adequadas para se soldar com corrente pulsada e transferência metálica em voo livre. Entretanto, Smati (1986) afirma que soldagens MIG/MAG Pulsado feitas com uma mistura de Ar+5%CO<sub>2</sub> mostraram um nível baixo de

respingos e uma boa aparência visual do cordão de solda.

Deste modo, contando com a disponibilidade de gases presentes no laboratório, escolheu-se como gás de proteção uma mistura comercial com composição química nominal de 92%Ar+8%CO<sub>2</sub> e como metal de adição foram sempre utilizados dois arames-eletrodos da classe AWS ER70S-6, com diâmetro de 1,2 mm cada, cuja composição química nominal é apresentada na Tab. 3.2.

Tabela 3.2 – Composição química nominal do arame-eletrodo utilizado nesse trabalho (AWS, 2005)

Componentes	C	Mn	Si	Cr	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Cu
Teor (%) <sup>(*)</sup>	0,06-0,15	1,40-1,85	0,80-1,15	0,15	0,025	0,035	0,15	0,15	0,15	0,03	0,5

<sup>(\*)</sup> Valores individuais são valores máximos

Antes das soldagens, o teor de CO<sub>2</sub> da mistura escolhida foi verificado através de um aparelho-analisador de composição química do gás (Oxibaby), mostrando um valor médio de 9,4%, como especificado na Tab. 3.3. Manteve-se a vazão do gás em torno de 25 a 26 l/min. Antes de cada série de experimentos, a vazão foi verificada usando-se um fluxômetro (bibímetro).

Tabela 3.3 - Verificação da composição química do gás de proteção

Medidas	1	2	3	4	5	6	7	8
Teor de CO <sub>2</sub> (%)	9,5	9,4	9,4	9,3	9,3	9,3	9,4	9,4

### 3.3 - Equipamentos e bancada experimental

Para desenvolvimento deste trabalho, usou-se os seguintes equipamentos:

- três fontes de soldagem (duas fontes MTE Digetec 600 e uma fonte Digiplus A7), com seus respectivos alimentadores de arame;
- duas tochas de soldagem para MIG/MAG Duplo Arame;
- uma mesa de coordenadas X-Y, que permite através de programação realizar a trajetória de soldagem e ajustar a velocidade de 0,1 a 80 mm/s, com resolução 0,1 mm/s, sendo o comprimento do eixo X = 1000 mm e do eixo Y = 570 mm (a calibração da mesa de coordenadas está apresentada no Apêndice I);
- um sistema de aquisição de dados.

Estes equipamentos foram dispostos na forma de uma bancada de soldagem ilustrada pela Fig. 3.4.

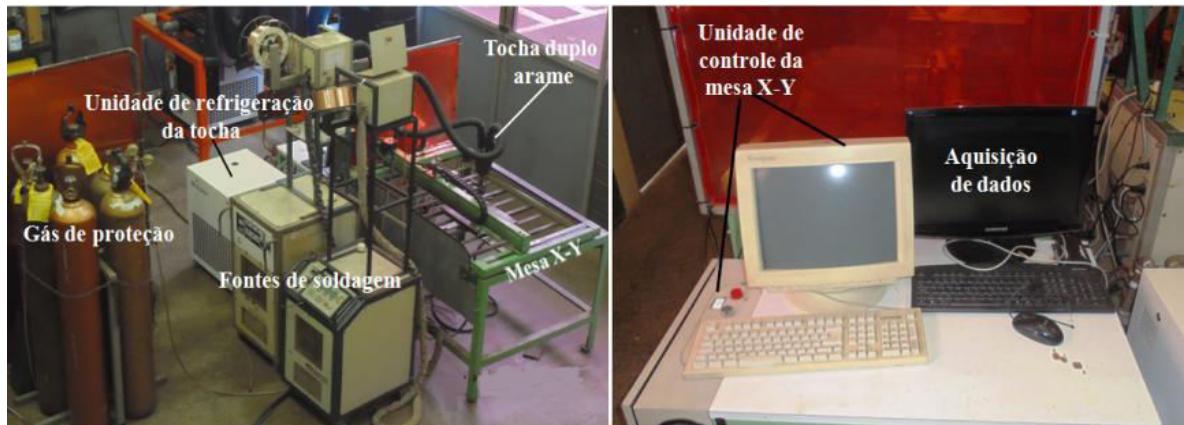


Figura 3.4 - Apresentação de banca experimental utilizada no desenvolvimento do trabalho

Para fixação de placas de teste na mesa de soldagem usou-se os dispositivos e ferramentas apresentados nas Fig. 3.5 e Fig. 3.6

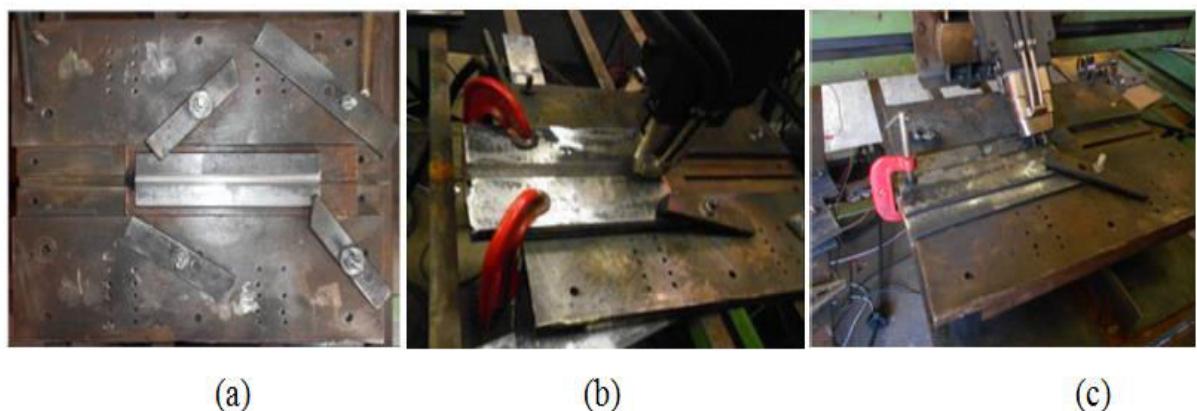


Figura 3.5 - Visualização das ferramentas utilizadas para fixação de placas de teste na posição plana em (a) - soldagem de passe de enchimento; (b) - soldagem multipasse e (c) - soldagem de chapa fina

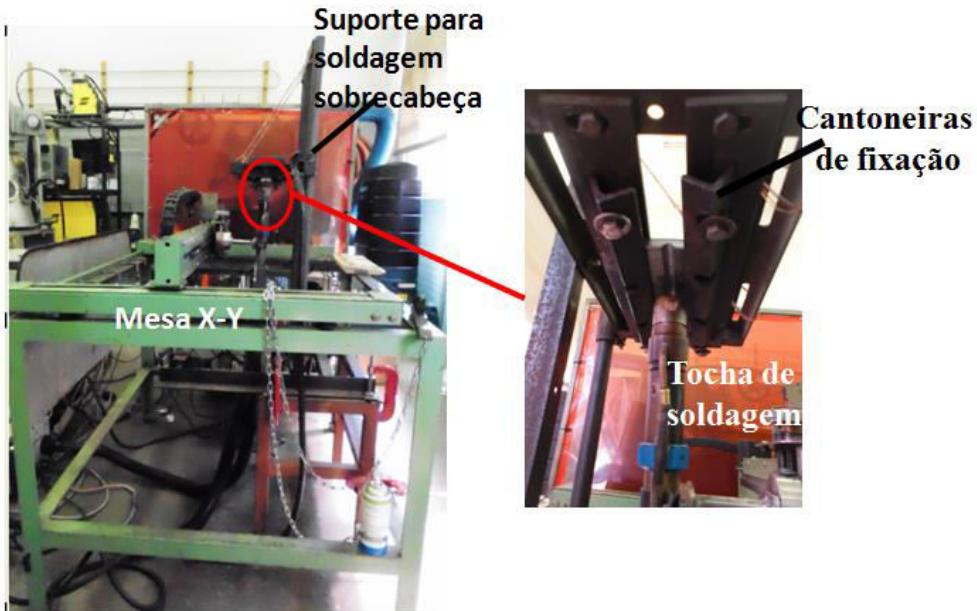


Figura 3.6 - Suportes para fixação de placas de teste para soldagem de passe de enchimento na posição sobrecabeça

As fontes MTE Digitec 600 foram usadas para soldagem MIG/MAG Duplo Arame no modo Pulsado(+)–Pulsado(+). Estas fontes permitem a interligação entre elas e a consequente sincronização entre a pulsação de cada arame. A fonte DIGIPlus A7, por sua vez, é uma fonte de soldagem que tem uma interface aberta e que permite programar livremente diferentes formatos de ondas, dentre eles o MIG/MAG Pulsado, Curto-circuito Controlado (CCC) e o MIG/MAG CC-. Ela foi utilizada para soldagens nos modos Pulsado(+)–CCC(–) ou Pulsado(+)–Pulsado(–) como a fonte-seguidora. Como fonte-líder sempre foi utilizada MTE Digitec 600. O software da fonte Digiplus A7 é o mais antigo e de acordo com os dados de fabricante tem se fabricada uma outra fonte que sofreu um *upgrade* e apresenta melhores características. As características técnicas das fontes de soldagem e os dados de calibração dos alimentadores de arame estão apresentados no Anexo I e Apêndice I respectivamente.

Uma das tochas de soldagem utilizadas foi TBI Duplo Arame (modelo TD9), com potencial isolado, refrigerado à água. Os arames-eletrodos são paralelos com uma distância fixa de 10 mm entre si, como ilustra a Fig. 3.7, (a).

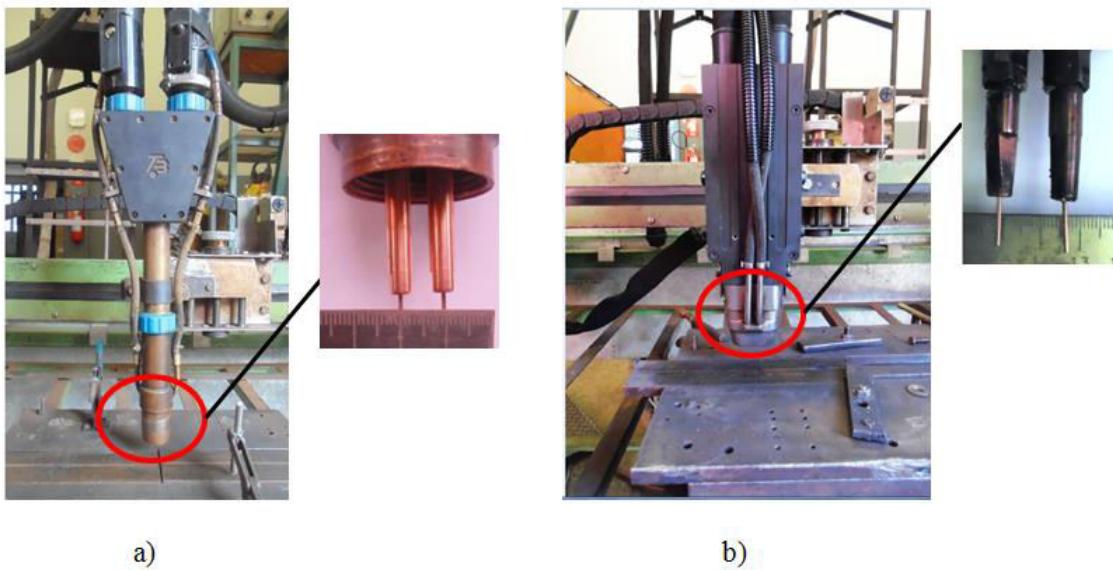


Figura 3.7 - Tochas de soldagem MIG/MAG Duplo Arame utilizadas no desenvolvimento do trabalho em (a) detalhe de distância entre os eletrodos da tocha TBi TD9 e em (b) detalhe de distância entre os eletrodos da tocha Binzel

Uma segunda tocha, fabricada pela Binzel, era também de potencial isolado e arames-eletrodos paralelos (Fig. 3.7, b). Uma característica desta tocha é a possibilidade de se variar a distância entre os arames, de 15 a 30 mm. Porém, neste trabalho esta distância foi mantida em 15 mm. A tocha da TBi modelo TD 9 foi utilizada na condição de soldagem de passe de enchimento na posição sobrecabeça e a tocha do Binzel foi empregada na soldagem de chapas finas, soldagem multipasse e soldagem de passes de enchimento em um único passe na posição plana. Ao longo do trabalho as tochas serão apresentadas de acordo com Tab. 3.4.

Tabela 3.4 - Representação das tochas de soldagem utilizadas nesse trabalho

Tocha de soldagem	Condições de soldagem onde foi utilizada a tocha	Representação
TBi modelo TD 9	Soldagem de passe de enchimento na posição sobrecabeça	Modelo 1
Binzel	Soldagem de chapa fina em junta sobreposta; soldagem de passe de enchimento na posição plana; soldagem multipasse na posição plana	Modelo 2

O monitoramento de tensão e corrente foi feito usando-se uma placa de aquisição National Instruments®, modelo NI USB-6009. Sua conexão com o computador é feita via porta USB. Para visualização dos sinais foi usado um programa desenvolvido no Laprosolda por Machado (2009) em linguagem *LabVIEW®* com interface gráfica, Fig. 3.8, apresentando os sinais adquiridos para o usuário e com a opção de salvá-los. As características da placa de aquisição de dados estão apresentadas no Anexo I.

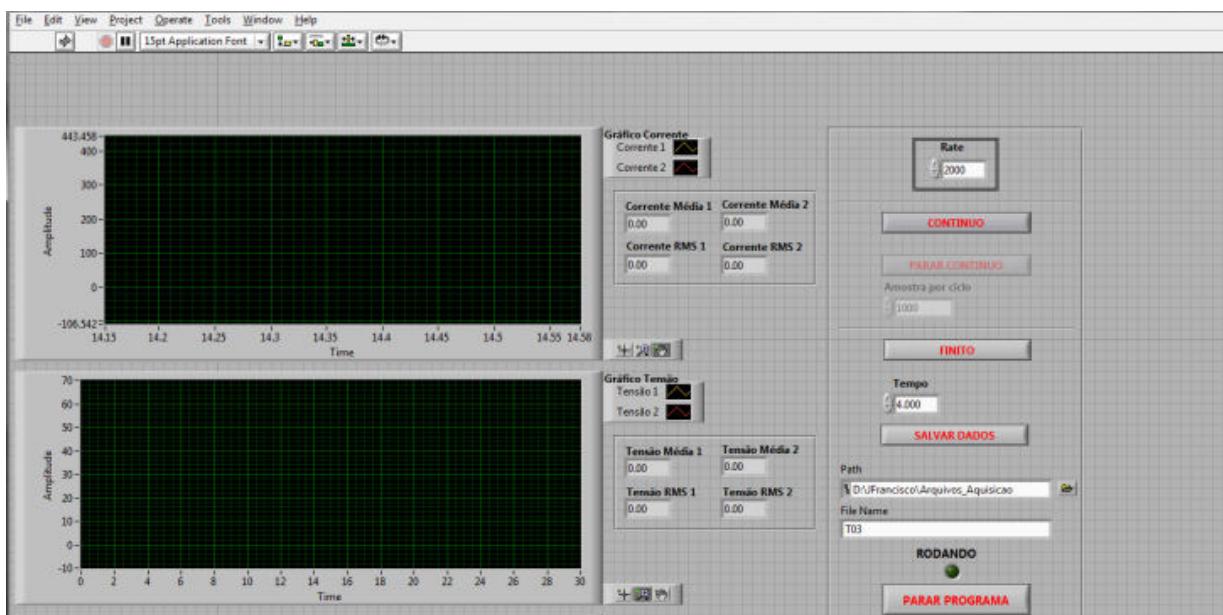


Figura 3.8 - Interface gráfica do programa de aquisição de dados

## CAPITULO IV

### DEFINIÇÃO DE PARÂMETROS DE SOLDAGEM

A definição dos parâmetros de soldagem para cada combinação foi dividida em quatro etapas:

- 1) Definição dos parâmetros para arame líder;
- 2) Definição dos parâmetros para arame seguidor;
- 3) Soldagem Duplo Arame com parâmetros encontrados nas etapas 1 e 2;
- 4) Definição de velocidade de soldagem.

*Obs: Na terceira etapa, verificou-se os parâmetros das etapas 1 e 2 e se os mesmos garantem uma boa estabilidade do processo sem interrupções nos arcos.*

Os parâmetros para arame-líder uma vez encontrados foram mantidos constantes para todas as combinações, sendo que os parâmetros do arame-seguidor foram variados de acordo com o modo operacional e polaridade de corrente. Para efeitos comparativos, a combinação Pulsado(+) - Pulsado(+) foi adotada como padrão e a corrente media para arame-líder foi de 280 A e para o arame-seguidor 180 A, independente do modo operacional e polaridade que estiver sendo utilizada. A velocidade de soldagem foi definida visando manter a mesma quantidade de metal depositado por comprimento de solda para todas as combinações. Para tal abordagem adotou-se que a relação velocidade de soldagem (Vs) e velocidade de alimentação total dos dois arames (Vat) seja constante:

$$\frac{V_s}{V_{at}} = \text{constante} \quad (4.1)$$

#### 4.1 - Definição de parâmetros da combinação Pulsado(+) - Pulsado(+)

As variáveis essenciais na soldagem com corrente pulsada são a corrente de pulso, corrente de base, tempo de corrente de pulso e tempo de corrente de base. Esses variáveis estão relacionados uma com as outras através da equação (4.2), a qual é convencionalmente utilizada para se calcular a corrente média:

$$I_m = \frac{I_p \cdot t_p + I_b \cdot t_b}{t_p + t_b} \quad (4.2)$$

onde:

$I_m$  - corrente média (A);

$I_p$  - corrente de pulso (A);

$t_p$  - corrente de pulso (ms);

$I_b$  - corrente de base (A);

$t_b$  - tempo de base (ms).

Atualmente não se tem uma metodologia geral para escolha dos parâmetros na soldagem MIG/MAG DA. Yudodibroto et al. (2006), estudando a soldagem MIG/MAG DA com corrente pulsada, citam que a escolha dos parâmetros para MIG/MAG DA pode ser baseada na metodologia aplicada à soldagem MIG/MAG pulsado com único arame, porém com mais dificuldades de se encontrar a condição estável, exigindo um número significante de experimentos "trial-error". Para encontrar os parâmetros, adotou-se algumas recomendações dadas na literatura e descritas a seguir.

Na soldagem MIG/MAG Duplo Arame é comum se utilizar no arame-líder uma corrente média maior do que a do arame-seguidor. Por exemplo, a corrente média do arame-seguidor deve ser 60-70% do valor da corrente média do arame-líder. Nesse sentido Motta e Dutra (2001) avaliaram o desempenho do MIG/MAG DA com potencial isolado na soldagem de uma junta em T de duas chapas de aço carbono de 13 e 16 mm de espessura empregando a corrente pulsada em ambos os arames. Os autores afirmam que para se obter a penetração adequada e preenchimento total da junta em único passe foi necessário empregar no arame-líder uma corrente média acima de transição (250 A para um arame ER70S-6 de 1 mm e gás Ar+2%O<sub>2</sub>) e no arame seguidor um valor de 150 A. Além disto, os autores citam que o arco do arame-líder deve ser mantido mais curto possível, não somente para evitar o desvio magnético, mas também para fazer o jato de plasma mais concentrado.

De acordo com Scotti e Ponomarev (2008), em função do gás de proteção (Ar+5%CO<sub>2</sub>) e do arame-eletrodo (ER70S-6, de 1,2 mm), foi adotado neste trabalho a corrente de transição (I<sub>t</sub>) como uma faixa de 230 a 250 A. Deste modo seguindo as recomendações do Motta e Dutra (2001) e Scotti e Ponomarev (2008), estabeleceu-se neste trabalho um valor de 280 A para corrente média do arame-líder e 180 A para o arame seguidor. Para encontrar os valores das demais variáveis envolvidos na equação (4.2), seguiu-se o procedimento descrito em trabalho de Scotti e Monteiro (2012). De acordo com Scotti e Monteiro (2012), quando se deseja obter uma boa penetração o valor da corrente de pulso (I<sub>p</sub>) deve ser muito acima do valor da corrente de transição (I<sub>t</sub>), ou seja, I<sub>p</sub>>>I<sub>t</sub>, para uma dada combinação arame-gás de proteção. A corrente de base, cuja função é manter o arco, deve ser estabelecida em função da corrente média desejada, mas recomenda-se não soldar com correntes de base menores do que 40 a 60 A. e, em seguida, estabeleceu-se que a corrente de pulso na soldagem Pulsado(+) será de 350 A quanto para arame-líder tanto para o seguidor com o tempo de pulso como 3,5 ms. Tendo os valores de I<sub>m</sub>, I<sub>p</sub>, e t<sub>p</sub> conhecidos e criando uma planilha de cálculo no ambiente Excel, foi possível calcular os valores da corrente de base (I<sub>b</sub>) e seus respectivos tempos, que no caso foram de 250 A para arame-líder e 100 A para o arame-seguidor, com tempo de 8 ms, que foi igual para os dois arames.

Para a DBCP, procurou-se escolher o que é geralmente comum para soldagem MIG/MAG com corrente pulsada. Novamente os Scotti e Monteiro (2012) citam que o valor recomendado para se usar na soldagem MIG/MAG é o máximo possível, para se conseguir uma elevada taxa de fusão. Porém, segundo Scotti e Ponomarev (2008), na soldagem MIG/MAG Duplo Arame a DBCP não deve superar 25 mm (efeito Joule e amolecimento excessivo do arame-eletrodo). Deste modo, escolheu-se como distância bico de contato-peça um valor intermediário de 21 mm que será mantido constante durante todo o desenvolvimento experimental.

Fazendo uma série de experimentos "trial-error", foi possível encontrar uma velocidade de alimentação adequada para cada combinação de correntes média e obter um comprimento do arco em torno de 2 a 3 mm. Procurou-se manter o comprimento do arco o mais curto possível, para se evitar interação magnética entre os dois arcos, que aumenta a sua intensidade quando o comprimento do arco cresce. Como foi mencionado no Capítulo III (Metodologia, insumos e equipamentos), na combinação Pulsado(+) - Pulsado(+) usou-se uma defasagem entre as pulsações da corrente do arame-líder e arame seguidor. O valor da defasagem foi escolhido em função de se obter uma defasagem "fora da fase" ("out of phase") ou seja a

corrente de pico do arame-seguidor deve ocorrer no meio do tempo de base do arame-líder. Aumentado gradualmente o tempo de defasagem e fazendo uma série de experimentos com observação posterior de oscilogramas típicos de corrente e tensão foi estabelecido um valor de 5,8 ms como adequado para garantir a defasagem "fora da fase" (ver Fig. 3.1 do Capítulo III - Metodologia, insumos e equipamentos).

Utilizando o procedimento acima descrito, encontrou-se os parâmetros de regulagem para arame-líder e depois, pelo mesmo princípio, para o arame-seguidor. Em seguida, foi feita uma série de soldagens com dois arames de simples deposição sobre chapa para verificar se as correntes médias monitoradas estariam correspondendo às reguladas. Os parâmetros finais de regulagem estão apresentados na Tab. 4.1. Vale-se ressaltar que durante todos os experimentos de soldagem as correntes de pulso ( $I_p$ ) e de base ( $I_b$ ), e seus respectivos tempos, serão mantidos constantes, exceto a velocidade de alimentação do arame que é sujeita a alterações (em torno de 0,1 a 0,3 m/min dependendo da condição de soldagem e do comprimento do arco).

Tabela 4.1 - Variáveis<sup>(\*)</sup> de regulagem encontrados para combinação Pulsado(+) - Pulsado(+) para uma DBCP de 21 mm e proteção com Ar+8%CO<sub>2</sub>

Arame	$I_p$ (A)	$I_b$ (A)	$tp$ (ms)	$tb$ (ms)	$V_a$ (m/min)	Im almejada (A)
Líder Pulsado(+)	350	250	3.5	8	10,3	280
Seguidor Pulsado(+)	350	100	3.5	8	5,8	180

(\*) o significado das abreviaturas das variáveis está apresentado logo após a equação 4.2

#### 4.2 - Definição dos parâmetros para Pulsado(-)

O primeiro modo operacional para soldagem em polaridade negativa foi o de corrente constante (CC-). A corrente constante em polaridade negativa foi escolhida em função dos dados apresentados no trabalho de Souza et al. (2010), que avaliaram a soldagem MIG/MAG CC- com vários níveis de corrente. Porém, ao se começar soldar com CC- (inicialmente com único arame) encontrou-se dificuldades na regulagem da velocidade de alimentação para se obter um arco com comprimento constante. Devido à alta instabilidade do arco na soldagem com CC- e consequentes danos para os consumíveis (principalmente bico de contato) decidiu-se substituir a soldagem CC- com soldagem com corrente pulsada em polaridade negativa. A justificativa para tal abordagem seria os benefícios de controle da transferência metálica que

poderia facilitar o destacamento da gota dando um impulso no período de corrente de pico, como esquematizado na Fig. 4.1. Ao contrário da soldagem com corrente constante na polaridade negativa, acredita-se que o impulso que dá a corrente de pico vai impedir o crescimento da gota e agilizar o destacamento da mesma.

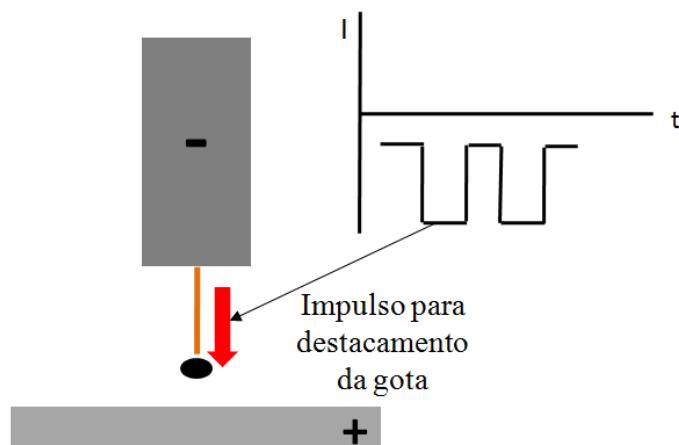


Figura 4.1 - Esquematização da hipótese de se usar a corrente Pulsada na polaridade negativa

Para se encontrar os parâmetros de regulagem no modo operacional Pulsado(-), utilizou-se os parâmetros encontrados para arame-seguidor (Item 4.1 deste capítulo) com inversão de polaridade de corrente. Para encontrar a velocidade de alimentação adequada, ajustou-se a mesma em um valor alto que garantiria que o arco fosse apagar e aumentou-se esse valor gradualmente até abrir o arco, evitando assim a fusão do bico de contato. Foi relativamente difícil manter o mesmo comprimento do arco em dois arames, pois o arco seguidor trabalhando em polaridade negativa tem o seu comprimento relativamente instável, principalmente por causa de escalada na superfície da ponta do arame-eletrodo, em busca de óxidos. Os parâmetros finais de regulagem estão apresentados na Tab. 4.2.

Tabela 4.2 - Variáveis<sup>(\*)</sup> de regulagem encontrados para a combinação Pulsado(+)–Pulsado(-), para uma DBCP de 21 mm e proteção com Ar+8%CO<sub>2</sub>

Arame	Ip (A)	Ib (A)	tp (ms)	tb (ms)	Va (m/min)	Im almejada (A)
Líder Pulsado(+)	350	250	3.5	8	10,3	280
Seguidor Pulsado(-)	-350	-98	3.5	8	7,7	-180

(\*) o significado das abreviaturas das variáveis está apresentado logo após a equação 4.2

Para o modo operacional Pulsado(-) não se fez experimentos ou estudos visando obter uma condição perfeita que apresentaria um comprimento de arco constante e mínimo respingos. O uso de defasagem em combinação Pulsado(+) - Pulsado(-) não mostrou efeito sobre a estabilidade do processo e não foi utilizado. A justificativa para tal abordagem seria a dificuldade que a soldagem em polaridade negativa traz em si e necessidade de mais tempo para se avaliar o processo empregando equipamentos sofisticados, tal como câmera de alta velocidade.

#### 4.3 Definição de parâmetros para modo operacional CCC(-)

O modo operacional CCC (Curto-Círcuito Controlado) foi desenvolvido e patenteado pela empresa nacional IMC. Como base para se encontrar os parâmetros de regulagem foram adotados parâmetros do Direne et al. (2012), que utilizaram a soldagem no modo operacional CCC com um único arame na confecção de passes de raiz com uma corrente média de 140 A. Outro trabalho que foi consultado é do Caimacan (2014), que soldou com MIG/MAG Duplo Arame com arame-seguidor trabalhando em CCC polaridade positiva e uma corrente média de 180 A. Analisando os dados obtidos por Direne et al. (2012) e Caimacan (2014) e fazendo uma série de experimentos "trial-error", foi possível encontrar a combinação de parâmetros que daria uma corrente média de 180 A, conforme mostrado na Tab. 4.3. Por ser a onda de corrente mais complexa, vale mostrar um período completo de onda (polaridade positiva) com seus respectivos parâmetros (Manual de instruções Digiplus A7, 2012), Fig. 4.2.

Tabela 4.3 - Variáveis<sup>(\*)</sup> encontrados para a combinação Pulado(+) - CCC(-), para uma DBCP de 21 mm e proteção com Ar + 8%CO<sub>2</sub>

Ia1 (A)	Ia2 (A)	ta1 (ms)	ta2 (ms)	Ic1 (A)	Ic2 (A)	tc1 (ms)	tc2 (ms)	Ic3 (A)	Ia3 (A)
- 320	-210	2	3	-95	-105	0,5	0,6	-224	-120
tr1 (ms)	tr2 (ms)	kr	di3 (A/ms)	Ucc (V)	Va (m/mi n)	Im almejada (A)			
0,6	0,6	1,8	-160	-10	7,9	-180			

(\*) o significado das abreviaturas das variáveis está apresentado no título da Figura 4.2

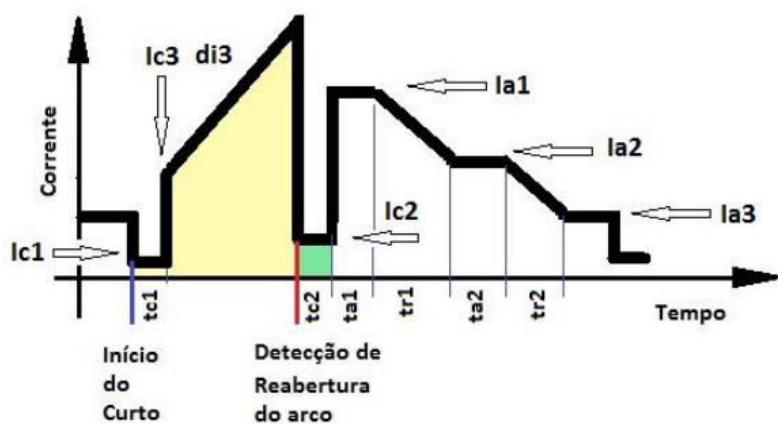


Figura 4.2 - Onda completa de modo operacional Curto-circuito Controlado onde: **Ia1** - corrente de pico de arco; **Ia2** - corrente para aumento da taxa de fusão; **ta1** - tempo da corrente Ia1; **ta2** - tempo da corrente Ia2; **Ia3** - corrente de manutenção do arco; **di3** - taxa de variação de subida da corrente durante o curto em A/ms; **tr1** - tempo de rampa do patamar 1 para o patamar 2; **tr2** - tempo de rampa do patamar 2 para o patamar 3; **tc1** - tempo assentamento da gota; **tc2** - tempo espera de reabertura; **Ic1** - corrente de assentamento de gota; **Ic2** - corrente de rompimento da ponte metálica

## CAPITULO V

### SOLDAGEM DE PASSE DE ENCHIMENTO EM ÚNICO PASSE NA POSIÇÃO PLANA

Para avaliar a habilidade da corrente contínua com pulsação (pulsado) polaridade negativa em soldar com MIG/MAG DA, procurou-se fazer um único passe de enchimento na posição plana sobre uma junta em que se simula já haver o passe de raiz, com as 3 combinações de modo operacional, isto é, Pulsado(+)–Pulsado(+), que é o modo de referência, Pulsado(+)–Pulsado(–) e Pulsado(+)–CCC(–).

#### 5.1 - Preparação de placas de teste para soldagem

As placas de teste foram feitas de barras-chata de aço carbono ABNT 1020. A espessura de 9,52 mm foi escolhida para evitar a perfuração durante a soldagem e não criar ambiguidades na observação de penetração e da zona afetada pelo calor. Como o início e fim do cordão de solda são regiões de maior instabilidade do arco, estabeleceu-se 200 mm como um comprimento adequado para uma placa de teste, e tirando o começo e final da solda (aproximadamente 20 mm de cada lado) o comprimento útil seria de 160 a 170 mm. Resumindo, a aparência e as dimensões finais de placa de teste estão apresentadas na Fig. 5.1.

No meio da placa foi usinado um chanfro no formato de semi-elipse com uma profundidade de 4 mm e largura de 10 mm como mostrado na Fig. 5.1. O resto da espessura da chapa (aproximadamente 5,5 mm) apresenta a simulação de passe de raiz concluído. Nesse caso foi necessário fazer tal simulação, pois a soldagem de um passe de raiz de verdade criaria dificuldades na observação da penetração e da ZAC dos passes seguintes. A confecção desse chanfro foi feita utilizando uma fresadora eletromecânica com uma fresa de topo de metal duro com diâmetro de 10 mm. Na confecção do chanfro, procurou-se manter a profundidade

com uma boa precisão, para não interferir nos resultados de medição de penetração. A precisão atingida com as barras e equipamento disponíveis foi de  $+0,2$  mm (a profundidade nominal foi de 3,9 mm e largura 10 mm). Os parâmetros de usinagem e a ferramenta estão apresentados na Tab. 5.1.

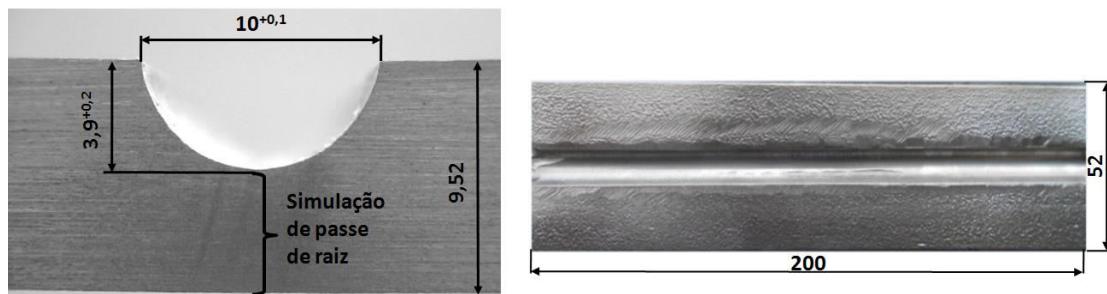
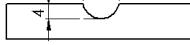


Figura 5.1 - Placa de teste utilizada na soldagem de passes de enchimento em um único passe na posição plana

Tabela 5.1 - Parâmetros de usinagem e a ferramenta utilizada na confecção dos chanfros

Formato de chanfro	Ferramenta	RPM	Velocidade de corte (mm/min)	Profundidade de passe (mm)	Quantidade de passes	Inclinação da ferramenta
		2800-3000	45	3,5 e 0,5	2	90°

Utilizou-se nessa condição de soldagem a tocha modelo 2 (ver Tab. 3.4, Item 3.3 Equipamentos e bancada experimental) com os arames-eletrodo paralelos e afastados um do outro a uma distância de 15 mm. A distância bico de contato-peça de 21 mm e medida a partir do fundo do chanfro foi mantida constante durante todas as soldagens. Os arames-eletrodo foram posicionados um atrás do outro (sequencial) de acordo com a direção de soldagem como ilustrado na Fig. 5.2. O ângulo de trabalho e o ângulo de ataque foram de 90° (Fig. 5.2 (b)). A tocha foi posicionada de tal maneira que os eletrodos encontram-se no meio do chanfro, Fig. 5.2 (a)

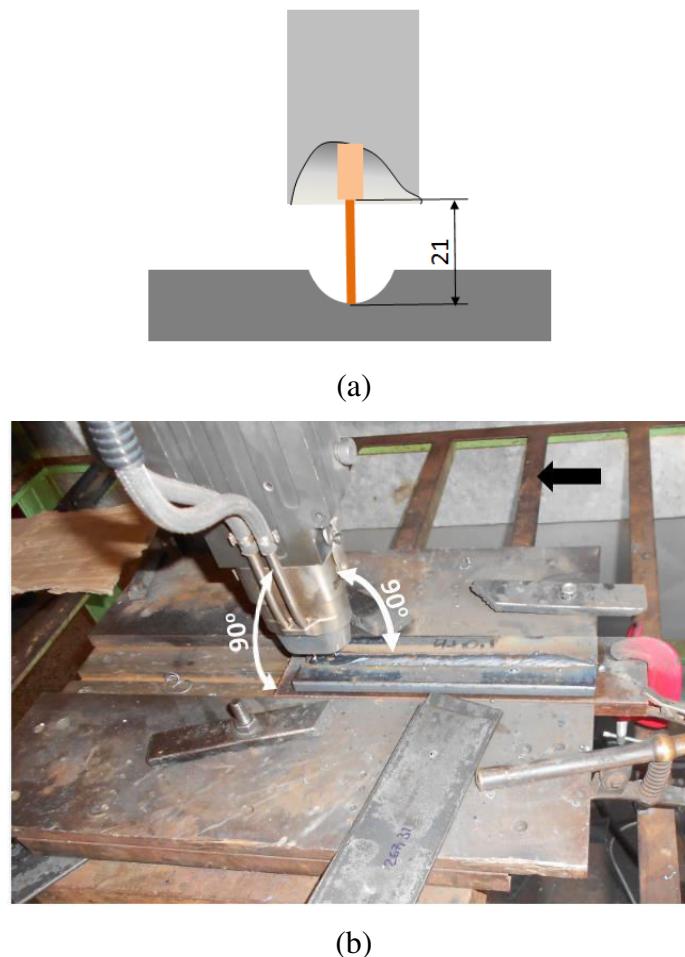


Figura 5.2 - Esquematização da posição da tocha de soldagem em relação à placa de teste: em (a) detalhe distância bico de contato-peça; em (b) detalhe para o ângulo de ataque, de trabalho e direção de soldagem

As variáveis essenciais, tais como parâmetros de pulsação de corrente (modo operacional pulsado) e parâmetros de curto-circuito (modo operacional CCC), permaneceram os mesmos encontrados no Capítulo IV (Definição dos parâmetros de soldagem). Uma única variável que foi submetida a ajuste foi a velocidade de alimentação dos arames-eletrodo, para encontrar o comprimento do arco almejado (de 2 à 3 mm).

Antes de se soldar em chanfro, os parâmetros foram conferidos em soldagem de simples deposição sobre a placa de aço carbono de 9,52 mm de espessura. Primeiramente foi encontrada a velocidade de soldagem que para dada velocidade de alimentação do arame garantisse o enchimento completo do chanfro. Após, a velocidade de soldagem foi crescida progressivamente com intuito de encontrar a faixa de velocidades em que cada combinação é exequível.

## 5.2 - Resultados

### 5.2.1 - Soldagem com combinação Pulsado(+) - Pulsado(+)

As variáveis de regulagem e monitorados da combinação Pulsado(+)–Pulsado(+) estão apresentados na Tab. 5.2, enquanto os respectivos oscilogramas da corrente e tensão encontram-se na Fig. 5.3 e aspecto dos cordões de solda resultantes na Fig. 5.4.

Tabela 5.2 - Variáveis de regulagem e monitorados ao se usar a combinação Pulsado(+) - Pulsado(+)

Variáveis de regulagem						
Arame	Ip (A)	Ib (A)	tp (ms)	tb (ms)	Va (m/min)	Vs (mm/s)
Líder Pulsado(+)	350	250	3,5	8	10,3	7
Seguidor Pulsado(+)	350	100	3,5	8	4,4	
Variáveis monitoradas						
Arame	Ip (A)	Ib (A)	tp (ms)	tb (ms)	Va (m/min)	Vs (mm/s)
Líder Pulsado(+)	346,8	249,5	3,8	8	9,7	6,8
Seguidor Pulsado(+)	342,4	96,7	3,2	7,8	4,6	

Obs **Ip**=corrente de pulso; **lb**=corrente de base; **tp**=tempo de pulso; **tb**=tempo de base; **Vs**=velocidade de soldagem; **Va**=velocidade de alimentação do arame;

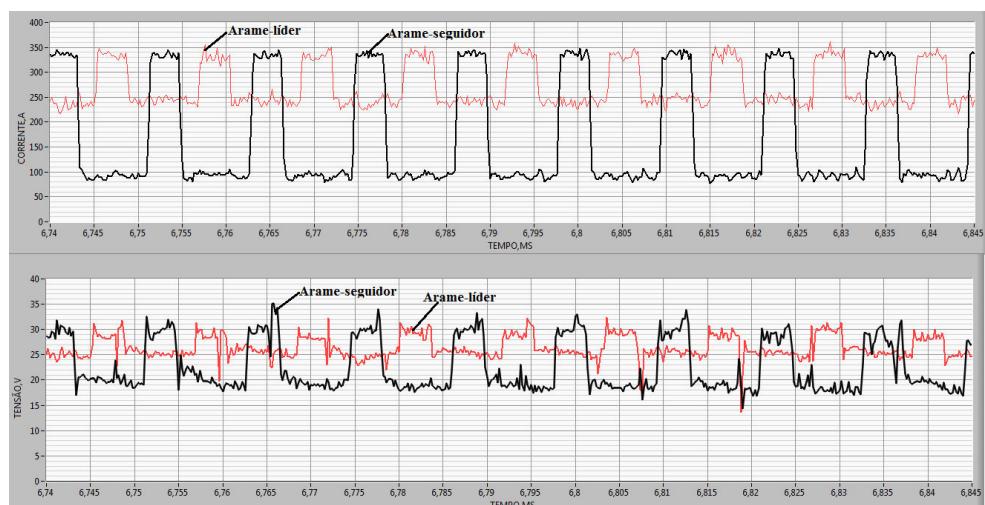


Figura 5.3 - Oscilogramas típicos de corrente e tensão ao se usar a combinação Pulsado(+) - Pulsado(+)

Vs (mm/s)	Aspecto superficial	Seção transversal
6,8		
25,7		
47,3		
52,1		

Obs Vs = velocidade de soldagem monitorada

Figura 5.4 - Aspecto visual e seção transversal dos cordões de solda feitos em um único passe ao se usar a combinação Pulsado(+) - Pulsado(+)

### 5.2.2 - Soldagem com combinações Pulsado(+) - Pulsado(-) e Pulsado(+) - CCC(-)

De forma análoga à combinação Pulsado(+) - Pulsado(+), os resultados das demais combinações estão apresentadas na Tab. 5.3 e Fig. 5.5 e 5.6, para a combinação Pulsado(+) - Pulsado(-), e Tab. 5.4 e 5.5 e Fig. 5.7 e 5.8, para a combinação Pulsado(+) - CCC(-). Por ter um número maior de variáveis, decidiu-se separar as variáveis de regulagem e monitorados para a combinação Pulsado(+) - CCC(-), colocando-os em duas tabelas diferentes.

Tabela 5.3 - Variáveis de regulagem e monitorados ao se usar a combinação Pulsado(+) - Pulsado(-)

Variáveis de regulagem						
Arame	Ip (A)	Ib (A)	tp (ms)	tb (ms)	Va (m/min)	Vs (mm/s)
Líder Pulsado(+)	350	250	3,5	8	10,3	8,4
Seguidor Pulsado(-)	-350	-98	3,5	8	7,7	
Variáveis monitoradas						
Arame	Ip (A)	Ib (A)	tp (ms)	tb (ms)	Va (m/min)	Vs (mm/s)
Líder Pulsado(+)	359,8	250,1	3,6	8	9,6	8,2
Seguidor Pulsado(-)	-302,2	-91,4	3,4	7,8	7,3	

Obs **Ip**=corrente de pulso; **Ib**=corrente de base; **tp**=tempo de pulso; **tb**=tempo de base; **Vs**=velocidade de soldagem; **Va**=velocidade de alimentação do arame

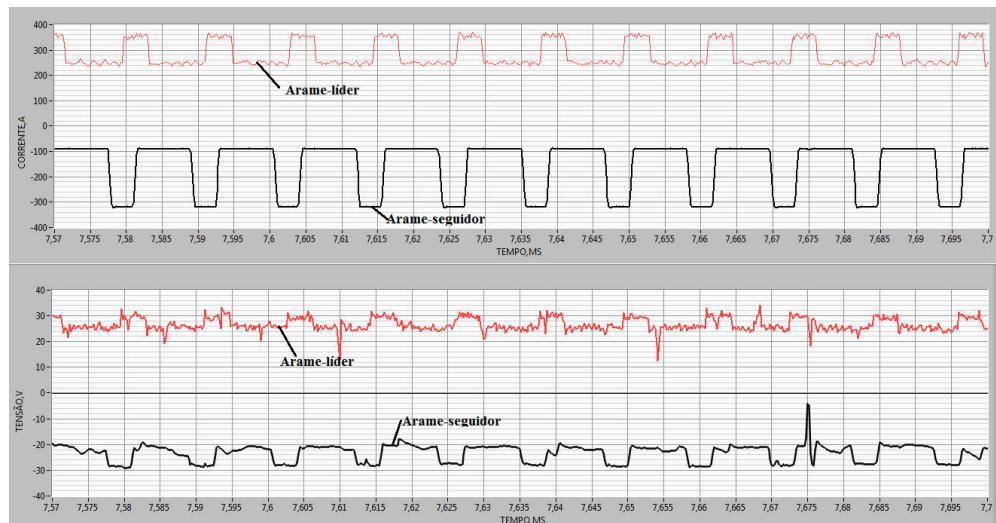


Figura 5.5 - Oscilogramas típicos de corrente e tensão ao se usar a combinação Pulsado(+) - Pulsado(-)

Vs (mm/s)	Aspecto visual		Seção transversal
8,2			
14,6			
24,7			

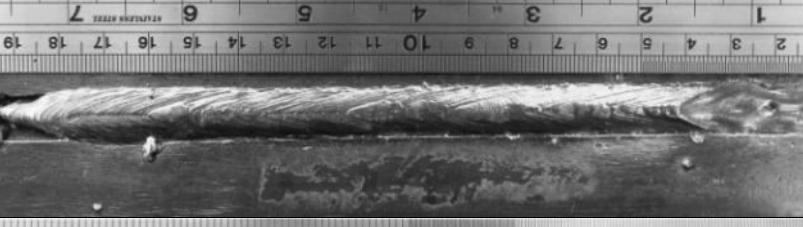
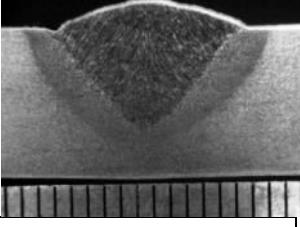
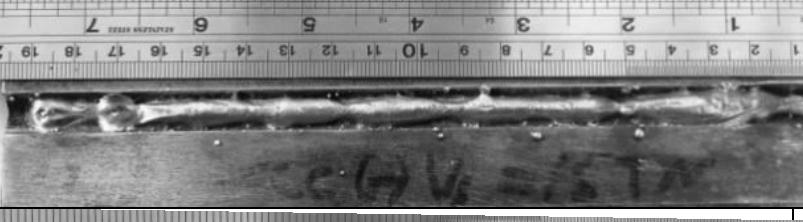
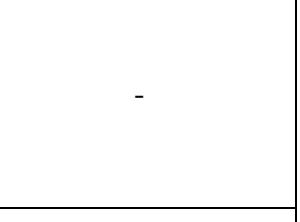
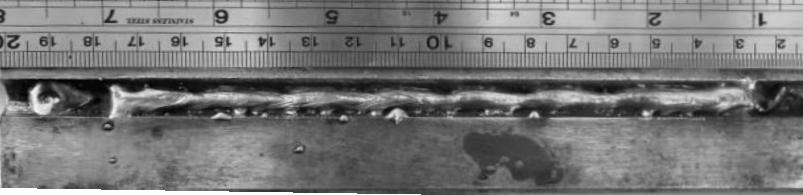
Obs: Vs = velocidade de soldagem monitorada

Figura 5.6 - Aspecto visual e seção transversal dos cordões de solda feitos em um único passe ao se usar a combinação Pulsado(+) - Pulsado(-)

Tabela 5.4 - Variáveis<sup>(\*)</sup> de regulagem ao se usar a combinação Pulsado(+) - CCC(-)

Líder Pulsado(+)							8,5	
Ip (A)	Ib (A)	tp (ms)	tb (ms)	Va (m/min)				
350	250	3,5	8	10,3				
Seguidor CCC(-)								
Ia1 (A)	Ia2, (A)	ta1 (ms)	ta2 (ms)	Ic1 (A)	Ic2 (A)	tc1 (ms)	Ic3 (A)	
-320	-210	2	3	-95	-105	0,5	-224	
tr1 (ms)	tr2 (ms)	kr	di3 (A/ms)	Ucc, (V)	Va (m/min)			
0,6	0,6	1,8	-160	-10	7,9			

(\*) o significado das variáveis está apresentado no Item 4.1 (para pulsado) e Item 4.3 (para CCC), no Capítulo 4 Definição dos Parâmetros de Soldagem

Vs (mm/s )	Aspecto visual	Seção transversal
8,3		
14,6		
24,4		

Obs Vs= velocidade de soldagem monitorada

Figura 5.7 - Aspecto visual e seção transversal dos cordões de solda feitos em um único passe ao se usar a combinação Pulsado(+) - CCC(-)

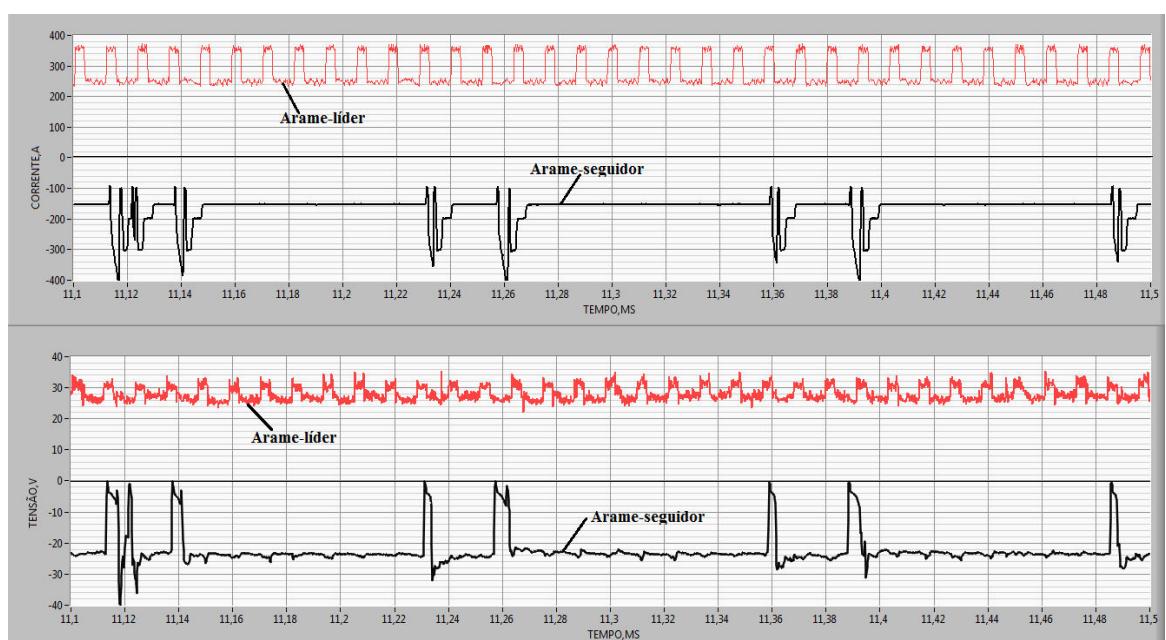


Figura 5.8 - Oscilogramas típicos de corrente e tensão ao se usar a combinação Pulsado(+) - CCC(-)

Tabela 5.5 - Variáveis<sup>(\*)</sup> monitorados ao se usar a combinação Pulsado(+) - CCC(-)

Líder Pulsado(+)									
Ip (A)	Ib (A)	tp (ms)	tb (ms)	Va (m/min)			Vs (mm/s)		
350	250	3,5	8	9,7					
Seguidor CCC(-)									
Ia1 (A)	Ia2 (A)	ta1 (ms)	ta2 (ms)	Ic1 (A)	Ic2 (A)	tc1 (ms)	tc2 (ms)	Ic3 (A)	Ia3 (A)
-320	-210	2	3	-95	-105	0,5	0,6	-224	-120
tr1 (ms)	tr2 (ms)	kr	di3 (A/ms)	Ucc (V)	Va (m/min)				
0,6	0,6	1,8	-160	-10	7,5				

(\*) o significado das variáveis está apresentado no Item 4.1 (para pulsado) e Item 4.3 (para CCC), capítulo 4 (Definição dos Parâmetros de Soldagem)

### 5.3 - Discussão dos resultados

Observando-se a aparência visual dos cordões de solda das combinações Pulsado(+) - Pulsado(-) e Pulsado(+) - CCC(-) nas Fig. 5.6 e 5.7, percebe-se que somente os cordões feitos com velocidades mais baixas dariam para fazer a comparação, por apresentar um completo enchimento de chanfro, mesma quantidade de metal depositado por unidade de comprimento e uma aparência visual relativamente boa como resumido na Fig. 5.9. Vale lembrar que os cordões com velocidades maiores foram feitos apenas para se estabelecer os limites de velocidade de soldagem de cada técnica e não serão avaliados nós mesmos critérios.

As corrente e tensões médias com seu respectivos valores eficazes dos testes feitos com três combinações estão apresentadas em uma única tabela (Tab. 5.6). De forma similar, os cordões de solda e respectivas seções só para estas condições também são apresentados em uma única figura (Fig. 5.9), para facilitar a discussão dos resultados. Analisando os dados da tabela pode-se observar que a taxa de fusão do arame-seguidor aumentou em quase 60 % para uma mesma corrente média quando se mudar de polaridade positiva para negativa. Como consequência a velocidade de soldagem aumentou em 1,4 a 1,5 mm/s para se fazer a junta com mesma quantidade de metal depositado por comprimento do cordão de solda, mostrando assim uma vantagem de se soldar com polaridade negativa.

Tabela 5.6 - Valores dos parâmetros monitorados para três combinações na soldagem de passe de enchimento em um único passe

Combinação	Arame	Im (A)	Um (V)	Irms (A)	Urms (V)	Va (m/min)	Vat (m/min)	Vs (mm/s)	Q (g/m)
Pulsado(+) - Pulsado(+)	Líder	272	26,8	276,6	27,1	9,7	14,3	6,8	311
	Seguidor	173	24,2	205,6	24,8	4,6			
Pulsado(+) - Pulsado(-)	Líder	282,8	27,3	278,3	27,5	9,6	16,9	8,2	308,5
	Seguidor	-174	-21,8	204,8	22,7	7,3			
Pulsado(+) - CCC(-)	Líder	282	28	286	28,1	9,7	17,2	8,3	311,9
	Seguidor	-172	-22,2	181,6	23,2	7,5			

*Obs: Im=corrente média; Um = tensão média; Irms - corrente eficaz; Urms - tensão eficaz; Va - velocidade de alimentação do arame para cada eletrodo; Vat - velocidade de alimentação total dos dois arames; Q - quantidade de metal depositado por unidade de comprimento*

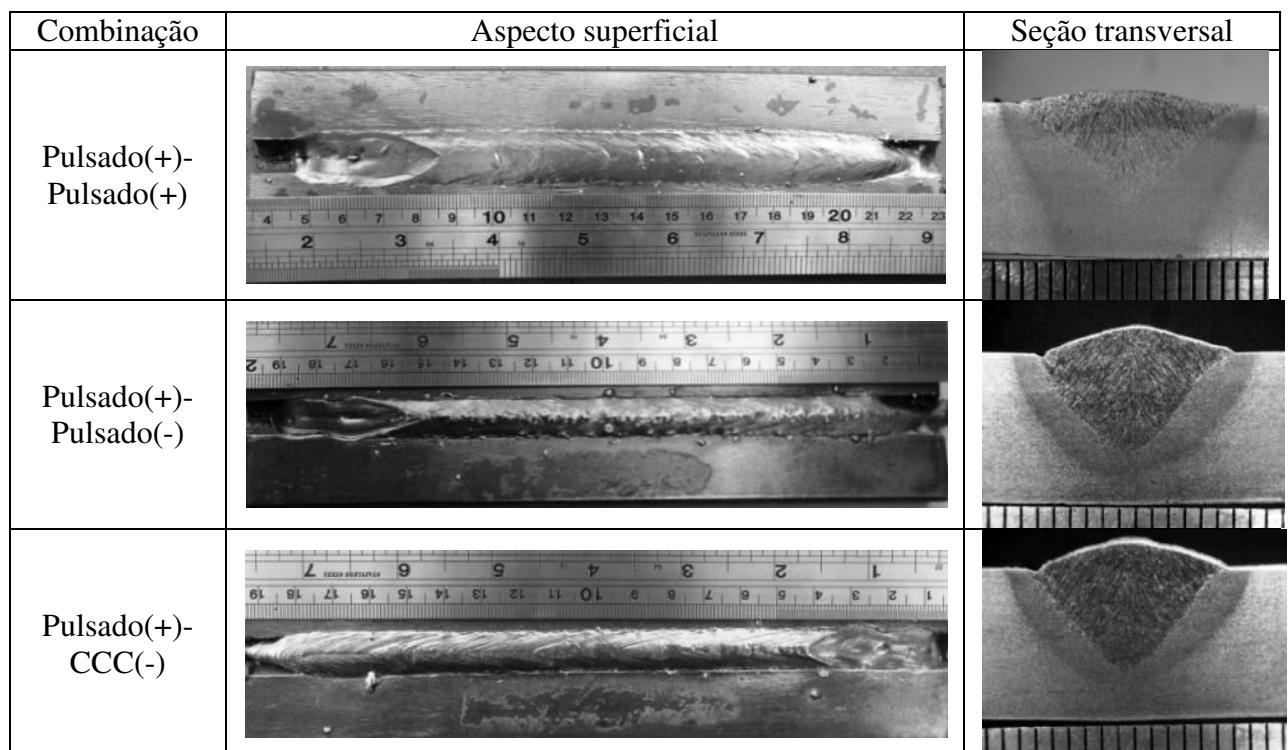


Figura 5.9 - Aparência visual e seção transversal dos cordões de solda das três combinações a serem comparados

As medições geométricas das seções transversais dos cordões foram feitas de acordo com esquema apresentado no Item 3.1 (Metodologia), Fig. 3.3. Os parâmetros geométricos medidos estão apresentados na Fig. 5.10

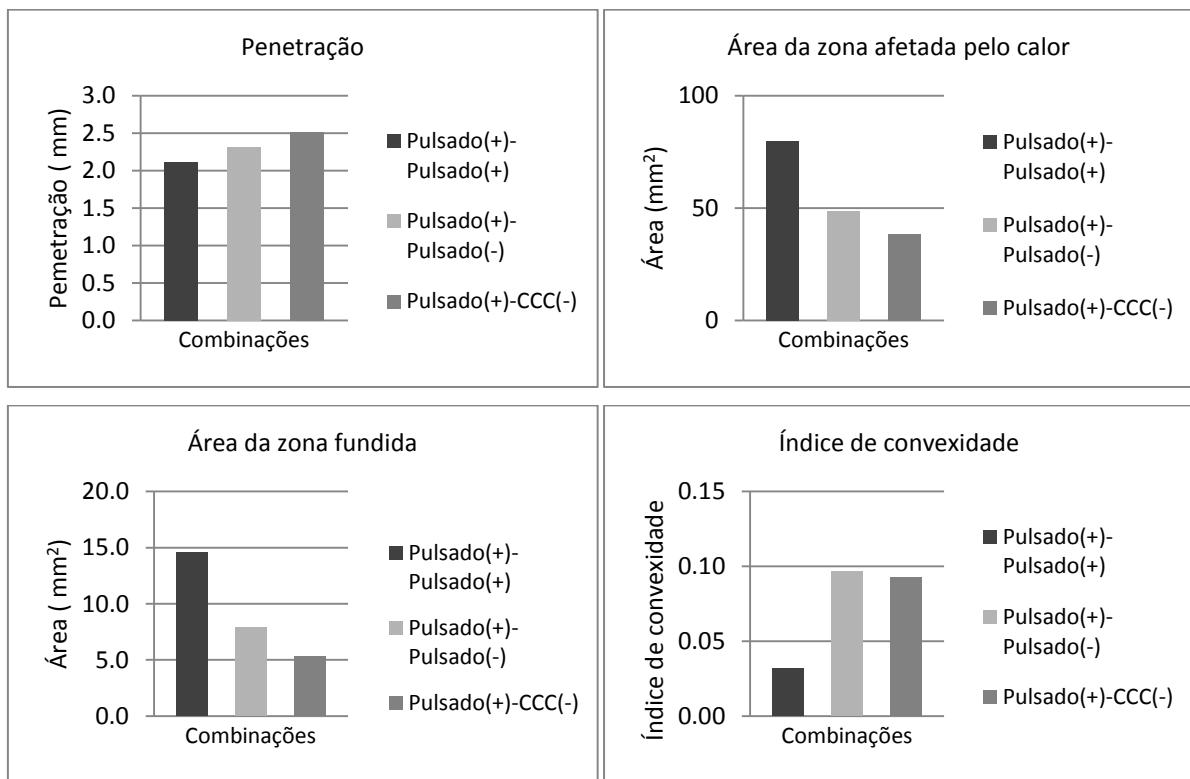


Figura 5.10 - Parâmetros geométricos de cordões de solda feitos com três combinações em um único passe na posição plana

Esperava-se que os cordões de solda feitos com Pulsado(+) - Pulsado(+) ficassem com uma penetração significativamente maior. A razão para tal hipótese seria a de que a polaridade positiva tem como característica típica uma penetração maior, comparando com polaridade negativa. Porém observou-se que a penetração das soldas feitas com polaridade negativa ficou levemente superior. Existem dados na literatura que provam que a polaridade nem sempre é um fator governante na penetração e que, dependendo da composição do gás de proteção, a penetração na polaridade negativa pode ser até 60 % à da positiva, como afirmam Souza et al. (2010). Entretanto seus resultados sobre a penetração na soldagem com polaridade negativa foram obtidos empregando-se processo MIG/MAG com único arame, trabalhando no modo corrente constante e como proteção gasosa foi usada uma mistura diferente (Ar+2%O<sub>2</sub>). Na literatura corrente ainda não se encontrou os resultados relacionados à soldagem com corrente pulsada em polaridade negativa, tampouco com dois arames.

Por outro lado, a diferença na penetração entre polaridade positiva e negativa não é tal pronunciada e um dos efeitos que pode ter a influência é o comprimento do arco do arame-líder, que no caso da polaridade negativa foi menor para diminuir o desvio magnético entre os arcos com polaridades diferentes. Assim, um arco curto é mais concentrado o que resultou em uma penetração levemente maior, como mostrado na Fig. 5.10. De qualquer forma, tal resultado foi inesperado e devido à ausência de dados na literatura sobre a soldagem MIG/MAG Duplo Arame na polaridade negativa seria difícil de propor uma hipótese que poderia explicar o fenômeno observado. Desta maneira decidiu-se primeiramente avaliar os resultados das demais condições de soldagem (soldagem de chapa fina e soldagem multipasse) para ver se confirmaria haver a mesma tendência nas combinações Pulsado(+) - Pulsado(-) e Pulsado(+) - CCC(-).

Na medição da área da zona afetada pelo calor e da zona fundida (ZF) os resultados coincidiram com os esperados e a soldagem com Pulsado(+) - Pulsado(+) mostrou uma ZAC e ZF significativamente maior (uma velocidade de soldagem menor e, consequentemente, maior energia de soldagem). Outro motivo que poderia causar uma ZAC maior na polaridade positiva é a distribuição de calor no arco. Segundo a literatura, aproximadamente 70% do calor do arco é gasto para aquecer o metal de base e os restantes 30% para fusão de arame. No caso da polaridade negativa, a maior parcela do calor estaria envolvida na fusão de arame-eletrodo. Por outro lado, comparando ZAC e ZF da combinação Pulsado(+) - Pulsado(-) com ZAC e ZF da Pulsado(+) - CCC(-), pode-se observar que a da Pulsado(+) - Pulsado(-) ficou maior. Pode ser que é consequência de uma velocidade de soldagem ligeiramente menor e maior energia. Um outro motivo seria o resultado da ação do arco seguidor que no caso da CCC(-) permanece apagado durante curto-circuito, o que diminui a energia imposta, resultando em uma ZAC menor.

A análise de índice de convexidade (Fig. 5.10) mostrou os resultados que estão em boa concordância com os dados da literatura para arame único. Os cordões de solda feitos com polaridade negativa apresentam uma convexidade maior, comparando com polaridade positiva. A literatura corrente explica tal efeito através de ação do arco em polaridade negativa, que por ser um arco mais "frio" não aquece o metal de base suficiente para garantir uma boa molhabilidade, o que resulta em cordões convexos e com irregularidade superficial. Uma outra explicação é maior velocidade de soldagem (menor energia e menor aquecimento) que em conjunto com característica típica de um arco trabalhando em polaridade negativa faz o cordão de solda ficar mais convexo.

Analizando os resultados obtidos, admitiu-se que existem três fatores que podem ter influência sobre a geometria do cordão feito quando se utilizar combinações Pulsado(+)–Pulsado(–) e Pulsado(+)–CCC(–), a saber:

- influência da variação da taxa de fusão do arame-eletrodo trabalhando em polaridade negativa;
- comprimento do arco em modo operacional Pulsado(+)–Pulsado(–) e Pulsado(+)–CCC(–);
- interação magnética entre os arcos com polaridades diferentes.

Uma outra abordagem para fazer a comparação entre as combinações mais diferenciada foi a avaliação econômica. As partes do custo geral da solda que têm uma influência maior sobre o preço final são os preços do arame e do gás de proteção. O Processo MIG/MAG DA Pulsado(+)–Pulsado(–) mostrou um ganho na velocidade de soldagem, levando a um consumo menor de gás e, consequentemente, uma diminuição do custo final. Por outro lado, a eficiência de deposição dele ficou relativamente baixa (Tab. 5.7), lembrando que para uma soldagem MIG/MAG a eficiência típica de deposição é em torno de 90 a 95%. O Pulsado(+)–Pulsado(+) se apresentou como um processo mais estável e de fácil controle e, como consequência, uma boa eficiência de deposição e grande envelope operacional.

Ao se comparar somente os cordões de solda indicados na Tab. 5.6, percebe-se que para encher o chanfro Pulsado(+)–Pulsado(+) exigiu uma velocidade de soldagem inferior. O processo MIG/MAG DA Pulsado(+)–CCC(–) tem uma velocidade de soldagem maior entre as três técnicas e, além disto, mostrou a eficiência de deposição igual a do Pulsado(+)–Pulsado(+). Isso pode acontecer devido ao controle da transferência metálica, que atua mesmo quando utiliza a polaridade negativa. Mas a desvantagem dele é um envelope operacional muito restrito, como no caso da Pulsado(+)–Pulsado(–).

Tabela 5.7 - Dados típicos de características econômicas das combinações para realizarem cordões de mesmo volume

Combinação	Vs (mm/s)	Vat (m/min)	Eficiência de deposição (%)	Vazão do gás de proteção (l/min)
Pulsado(+)–Pulsado(+)	6,8	16,3	93,0	25
Pulsado(+)–Pulsado(–)	8,2	17,0	88,4	
Pulsado(+)–CCC(–)	8,3	17,2	94	

*Obs Vs = velocidade de soldagem, Vat = velocidade de alimentação dos dois arames*

Analizando a aparência visual dos cordões de solda (Fig. 5.3, 5.5 e 5.7) o maior envelope operacional quanto à velocidade de soldagem mostrou a combinação Pulsado(+) - Pulsado(+) cuja faixa operacional seria aproximadamente de 7 até 55 mm/s (faixa de parâmetros verificados e exequível na Fig. 5.11). O Pulsado(+) - Pulsado(-) e Pulsado(+) - CCC(-) mostraram um envelope operacional menor, dando resultados aceitáveis somente para velocidades de soldagem em torno de 8,2 a 8,3 mm/s.

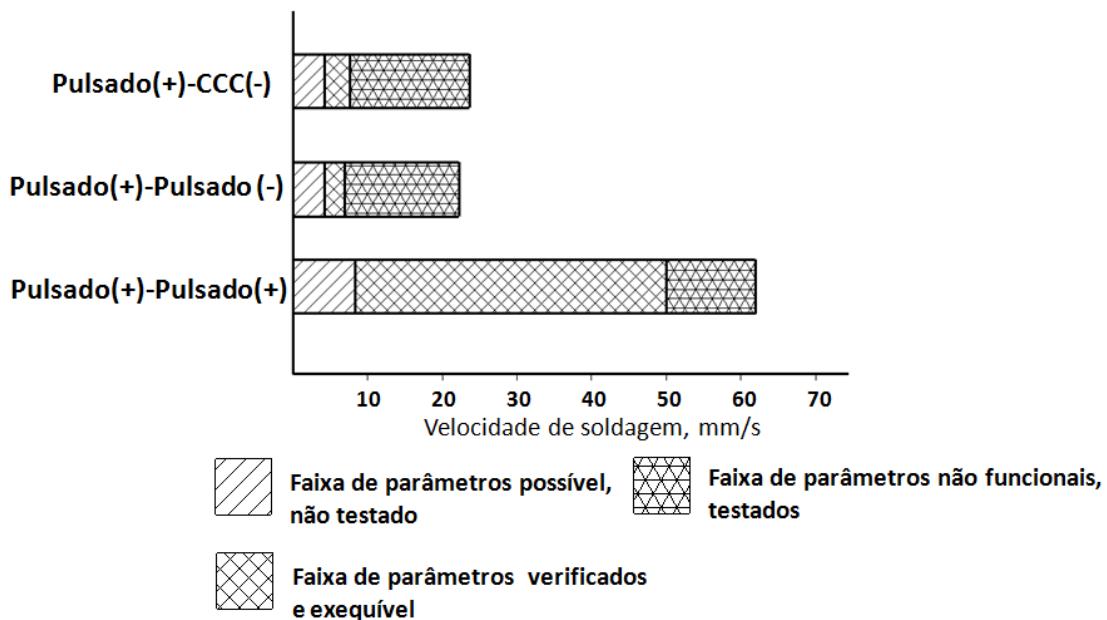


Figura 5.11 - Envelope operacional para cada combinação quanto à velocidade de soldagem

## CAPITULO VI

### SOLDAGEM DE CHAPAS FINAS EM UMA JUNTA SOBREPOSTA NA POSIÇÃO PLANA

Existem várias construções metálicas onde se utiliza de chapas com espessuras menores do que 5 mm (por exemplo, tubos de ventilação e recipientes de líquidos) unidas por soldagem. Geralmente não se exige resistência mecânica muita elevada neste tipo de junta, mas se procura estanqueidade e boa aparência visual. Neste capítulo será avaliado o desempenho da técnica MIG/MAG Duplo Arame com variação do modo operacional e polaridade de corrente no arame-seguidor aplicada à união de chapas finas em junta sobreposta.

#### 6.1 - Preparação de placa de teste e sua fixação durante soldagem

As placas de teste para esta condição foram feitas de barras-chata de aço carbono ABNT 1020 sobrepostas, de 3.2 mm de espessura, e preparadas sem abertura na sobreposição e ponteamento, como mostrado na Fig. 6.1.

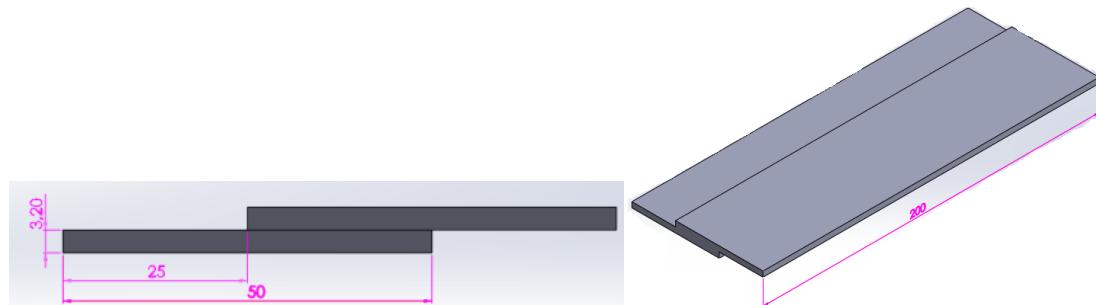


Figura 6.1 - Preparação de placas de teste para soldagem de chapas finas em junta sobreposta

A tocha de soldagem utilizada foi o modelo 2, (ver Tab. 3.4, Item 3.3 Equipamentos e bancada experimental) com os arames-eletrodo paralelos, e uma distância de 15 mm entre si, a uma distância bico de contato-peça de 21 mm e posicionados um atrás do outro (sequencial) de acordo com a direção de soldagem como ilustrado na Fig. 6.2. O ângulo de trabalho foi  $45^\circ$  e o ângulo de ataque  $90^\circ$ .

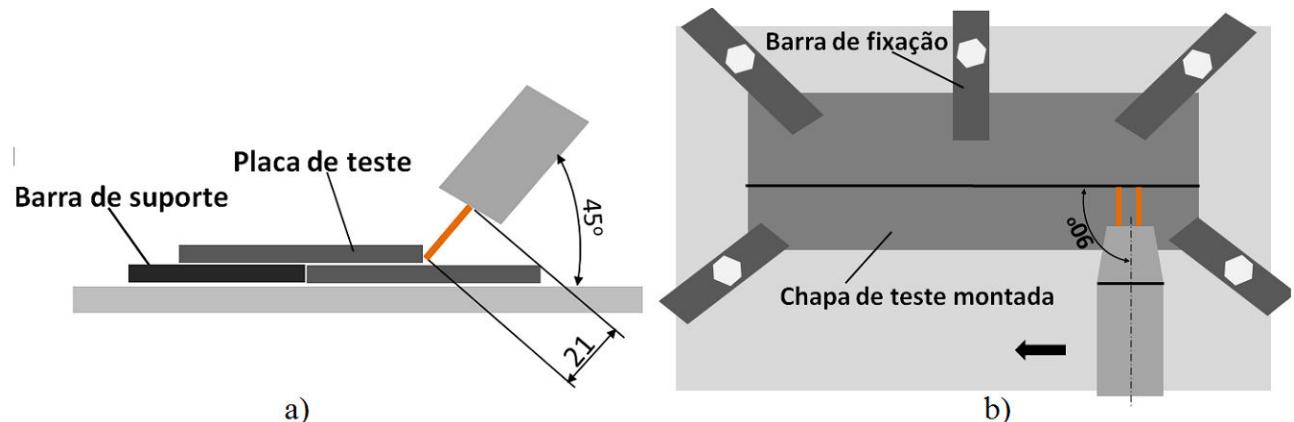


Figura 6.2 - Esquematização da posição da tocha de soldagem em relação à placa de teste: em (a) detalhe do ângulo de trabalho, distância bico de contato-peça; (b) fixação de placa de teste sobre a mesa de soldagem, feita com auxilio de barras aparafusadas numa base metálica rígida, com detalhe para o ângulo de ataque e direção de soldagem

Basicamente os parâmetros de soldagem para todas as combinações de modos operacionais (Pulsado(+)-Pulsado(+), Pulsado(+)-Pulsado(-) e Pulsado(+)-CCC(-)) permaneceram os mesmos descritos no Capítulo IV Definição de parâmetros de soldagem. Para verificar os parâmetros na nova condição de soldagem, foi feita uma série de experimentos com intuito de ajustar o comprimento do arco e observar a estabilidade do processo.

A velocidade de soldagem foi crescida progressivamente para achar a faixa de velocidades em que cada combinação é exequível para os dados parâmetros de soldagem. O critério para determinar a velocidade de soldagem limite e a velocidade alcançável para cada combinação foi a aparência visual do cordão de solda. Estabeleceu-se que para uma velocidade de soldagem máxima o cordão de solda deve apresentar uma aparência aceitável, sem defeitos visíveis mesmo com pequeno volume de metal depositado. Quando apareceram as descontinuidades visíveis tais como mordedura, costa de dragão ou falta de enchimento, tal velocidade foi considerada como alcançável.

## 6.2 - Resultados

### 6.2.1 - Soldagem com combinação Pulsado(+) - Pulsado(-)

As variáveis de regulagem e monitorados da combinação Pulsado(+) - Pulsado(-) estão apresentados na Tab. 6.1, enquanto o aspecto dos cordões resultantes está na Fig. 6.3 e os referentes oscilogramas da corrente e tensão estão apresentados na Fig. 6.4

Tabela 6.1 - Variáveis de regulagem e monitorados ao se usar a combinação Pulsado(+) - Pulsado(-)

Variáveis de regulagem						
Arame	Ip (A)	Ib (A)	tp (ms)	tb (ms)	Va (m/min)	Vs (mm/s)
Líder Pulsado(+)	360	255	3,5	8	10,3	20,2
Seguidor Pulsado(-)	-340	-90	3,5	8	7,2	
Variáveis monitoradas						
Arame	Ip (A)	Ib (A)	tp (ms)	tb (ms)	Va (m/min)	Vs (mm/s)
Líder Pulsado(+)	350	248,2	3,6	8	9,7	19,7
Seguidor Pulsado(-)	-340	-94,4	3,2	7,8	6,8	

Obs **Ip**=corrente de pulso; **Ib**=corrente de base; **tp**=tempo de pulso; **tb**=tempo de base; **Vs**=velocidade de soldagem; **Va**=velocidade de alimentação do arame

Vs (mm/s) *	Aspecto visual		Seção transversal
	19,7	24,7	
19,7			
24,7			
29,7			

Obs **Vs** = velocidade de soldagem monitorada

Figura 6.3 - Aspecto visual e seção transversal dos cordões de solda feitos em junta sobreposta ao se usar a combinação Pulsado(+) - Pulsado(-)

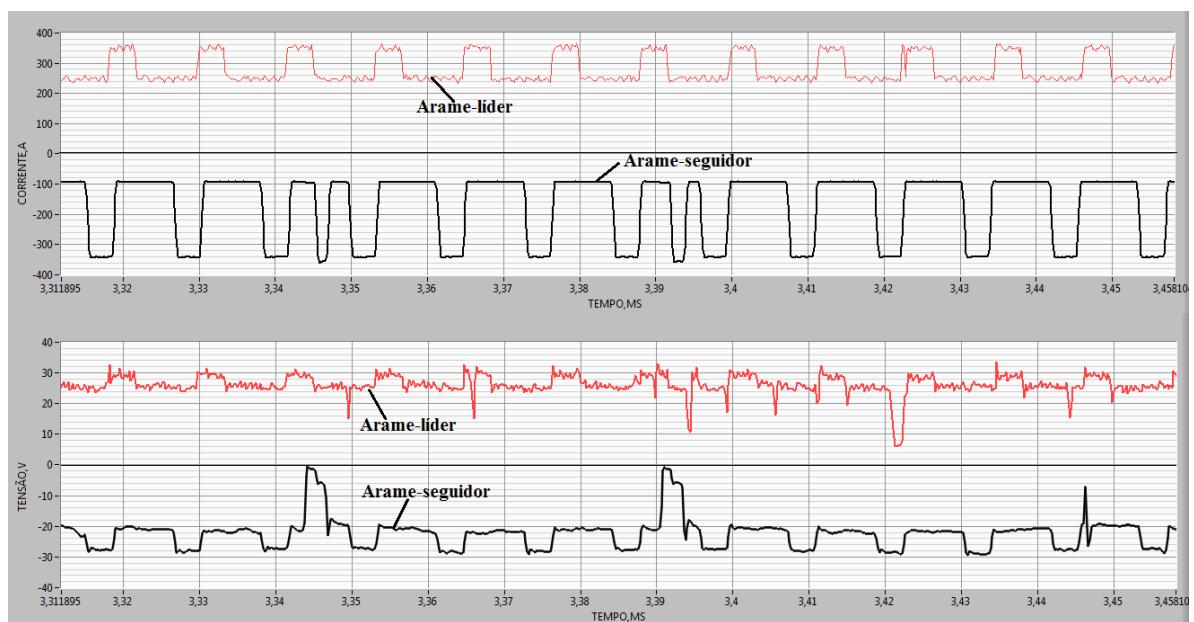


Figura 6.4 - Oscilogramas típicos de corrente e tensão da combinação Pulsado(+) - Pulsado(-)

### 6.2.2 - Soldagem com combinação Pulsado(+) - Pulsado(+) e Pulsado(+) - CCC(-)

Depois de soldagem com a combinação Pulsado(+) - Pulsado(-), soldou-se com combinações Pulsado(+) - Pulsado(+) e Pulsado(+) - CCC(-). De forma análoga, os resultados estão apresentados na Tab. 6.2 e Fig. 6.5 e 6.6, para a técnica Pulsado(+) - Pulsado(+), e Tab. 6.3 e 6.4 e Figuras 6.7 e 6.8, para a técnica Pulsado(+) - CCC(-). Por ter um número maior de variáveis, decidiu-se separar as variáveis de regulagem e monitoradas para a combinação Pulsado(+) - CCC(-) colocando-os em duas tabelas diferentes.

Tabela 6.2 - Variáveis de regulagem e monitoradas ao se usar a combinação Pulsado(+) - Pulsado(+)

Variáveis de regulagem						
Arame	Ip (A)	Ib (A)	tp (ms)	tb (ms)	Va (m/min)	Vs (mm/s)
Líder Pulsado(+)	350	260	3,5	8	9,6	19,2
Seguidor Pulsado(+)	343	98	3,5	8	6	
Variáveis monitoradas						
Arame	Ip (A)	Ib (A)	tp (ms)	tb (ms)	Va (m/min)	Vs (mm/s)
Líder Pulsado(+)	344	253	3,6	8	10	18,7
Seguidor Pulsado(+)	340,8	105,3	3,4	8	5,6	

Obs **Ip**=corrente de pulso; **Ib**=corrente de base; **tp**=tempo de pulso; **tb**=tempo de base; **Vs**=velocidade de soldagem; **Va**=velocidade de alimentação do arame

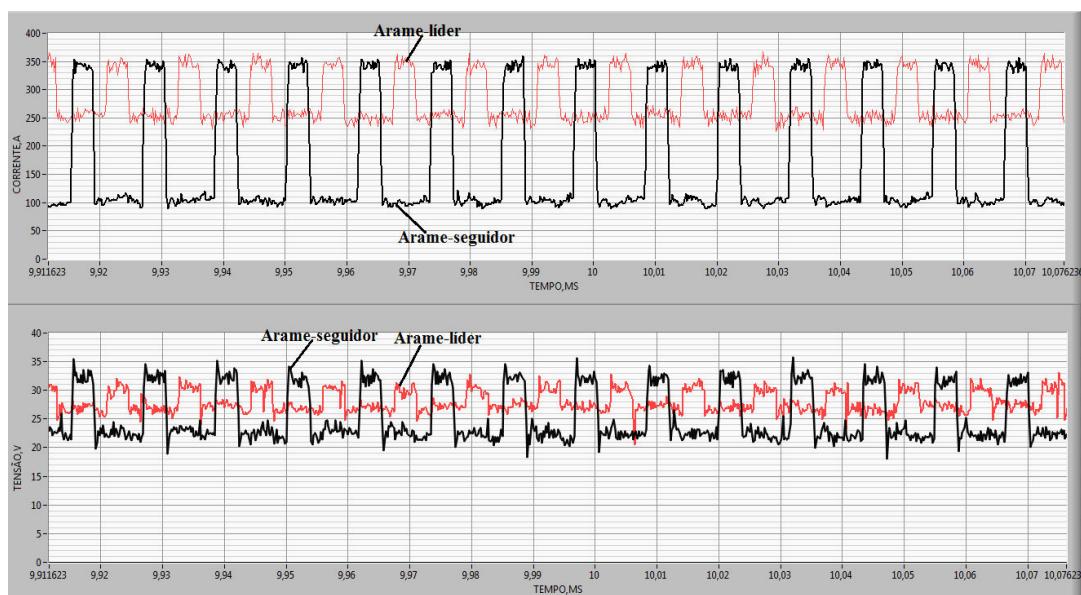


Figura 6.5 - Oscilogramas típicos de corrente e tensão ao se usar a combinação Pulsado(+) - Pulsado(+)

$V_s$ (mm/s)	Aspecto visual	Seção transversal
18,7		
26,5		-
39		-
48,7		-

Obs  $V_s$  = velocidade de soldagem monitorada

Figura 6.6 - Aspecto visual e seção transversal dos cordões de solda feitos em junta sobreposta ao se usar a combinação Pulsado(+) - Pulsado(+)

Tabela 6.3 - Variáveis<sup>(\*)</sup> de regulagem ao se usar a combinação Pulsado(+) - CCC(-)

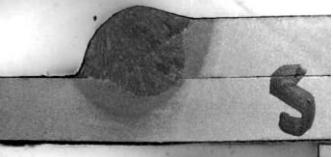
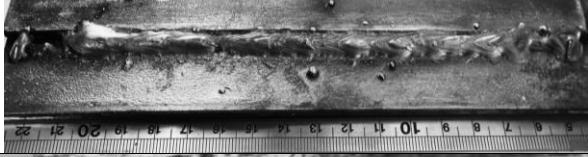
Variáveis do arame líder Pulsado(+)									
Ip (A)	Ib (A)	tp (ms)	tb (ms)	Va (m/min)				Vs (mm/s)	
360	255	3,5	8	10,4				20	
Variáveis do arame seguidor CCC(-)									
Ia1 (A)	Ia2( A)	ta1 (ms)	ta2 (ms)	Ic1 (A)	Ic2 (A)	tc1 (ms)	tc2 (ms)	Ic3 (A)	Ia3 (A)
-308	-210	2	3	-95	-105	0,5	0,6	-224	-140
tr1 (ms)	tr2 (ms)	kr	di3 (A/ms)	Ucc (V)	Va (m/min)				
0,6	0,6	1,8	-120	-10	7,2				

(\*) o significado das variáveis está apresentado no Item 4.1 (para pulsado) e Item 4.3 (para CCC), do Capítulo 4 (Definição dos Parâmetros de Soldagem)

Tabela 6.4 - Variáveis<sup>(\*)</sup> monitorados ao se usar a combinação Pulsado(+) - CCC(-)

Variáveis do arame líder Pulsado(+)									
Ip (A)	Ib (A)	tp (ms)	tb (ms)	Va (m/min)				Vs (mm/s)	
351	253,8	3,6	8	9,8				19,5	
Variáveis do arame seguidor CCC(-)									
Ia1 (A)	Ia2 (A)	ta1 (ms)	ta2 (ms)	Ic1 (A)	Ic2 (A)	tc1 (ms)	tc2 (ms)	Ic3 (A)	Ia3 (A)
-306,6	-213	2	3,6	-108	-114	0,6	0,6	-246	-142,7
tr1 (ms)	tr2 (ms)	kr	di3 (A/ms)	Ucc (V)	Va (m/min)				
0,6	0,6	1,8	120	-10	6,8				

(\*) o significado das variáveis está apresentado no Item 4.1 (para pulsado) e Item 4.3 (para CCC), no Capítulo 4 (Definição dos Parâmetros de Soldagem)

Vs (mm/s)	Aspecto visual	Seção transversal
19,5		
24,4		-
29,2		-

Obs Vs - velocidade de soldagem monitorada

Figura 6.7 - Aspecto visual e seção transversal dos cordões de solda feitos em junta sobreposta ao se usar a combinação Pulsado(+) - CCC(-)

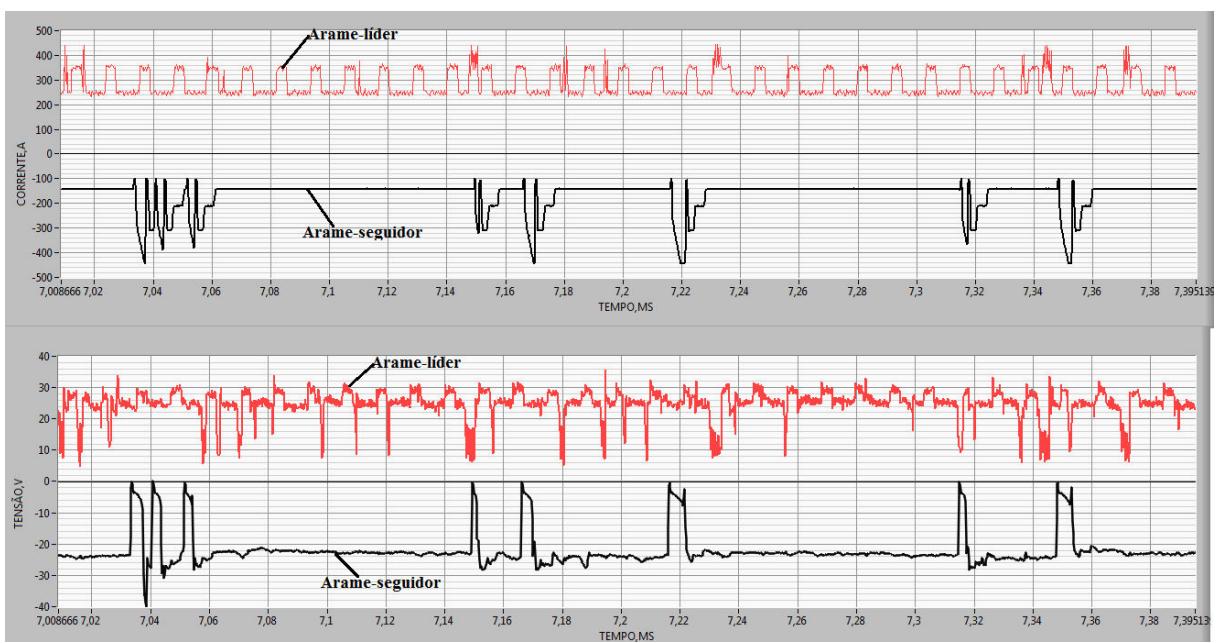


Figura 6.8 - Oscilogramas típicos de corrente e tensão ao se usar a combinação Pulsado(+) - CCC(-)

### 6.3 - Discussão dos resultados

De maneira análoga a Capítulo V serão avaliados os cordões de solda com velocidades inferiores e um bom acabamento cujas aparência e dados adquiridos de corrente e tensão estão resumidos na Tab. 6.5 e Fig. 6.9.

Tabela 6.5 - Valores dos parâmetros monitorados para três combinações na soldagem de chapas finas em junta sobreposta

Combinação	Arame	Im (A)	Um (V)	Irms (A)	Urms (V)	Va (m/min)	Vat (m/min)	Vs (mm/s)	Q (g/m)
Pulsado(+) - Pulsado(-)	Líder	280,5	26,9	284,6	27,07	9,7	16,5	19,7	124,5
	Seguidor	-170	-27,9	205,5	28,2	6,8			
Pulsado(+) - Pulsado(+)	Líder	280,1	26,7	283,5	27	10	15,6	18,7	127,1
	Seguidor	173,6	23,2	207,5	24	5,6			
Pulsado(+) - CCC(-)	Líder	286,5	24,7	291,25	25,2	9,8	16,5	19,5	127,4
	Seguidor	-167	-23	175,6	24,4	6,8			

Obs: **Im** = corrente média; **Um** = tensão média; **Irms** = corrente eficaz; **Urms** = tensão eficaz; **Va** = velocidade de alimentação do arame para cada eletrodo; **Vat** = velocidade de alimentação total dos dois arames; **Q** = quantidade de metal depositado por unidade de comprimento

De forma diferenciada às seções transversais de soldagens de topo, a medição de parâmetros geométricos de um cordão de solda feito em uma junta sobreposta não leva a parâmetros significativos para uma comparação. Por isto, a discussão dos resultados será apresentada de uma forma qualitativa, baseando-se na análise visual das seções transversais e das superfícies dos cordões de solda. Para facilitar a comparação e discussão dos resultados, os cordões de solda de três combinações serão apresentados em uma única figura (Fig. 6.9).

Em termos de geometria os três cordões de solda são totalmente diferentes apesar de ser feitos com a mesma corrente média e a mesma quantidade de metal depositado. Pode-se perceber que as combinações Pulsado(+) - Pulsado(-) e Pulsado(+) - CCC(-) apresentaram um perfil com penetração pronunciada na raiz da junta enquanto o perfil do cordão feito com Pulsado(+) - Pulsado(+) apresenta uma penetração mais uniforme quanto na chapa de cima tanto de baixo e na raiz. Esta característica de ter a polaridade negativa favorecendo maior penetração não era esperada porem já é segunda evidência de se observar a maior penetração na soldagem com combinações Pulsado(+) - Pulsado(-) e Pulsado(+) - CCC(-).

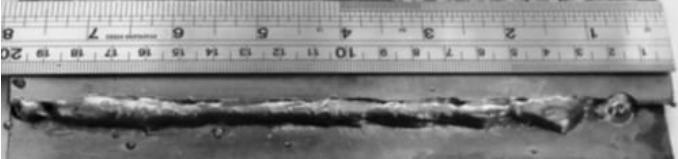
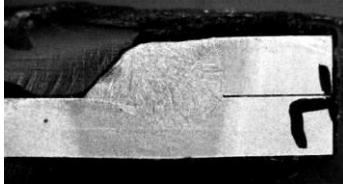
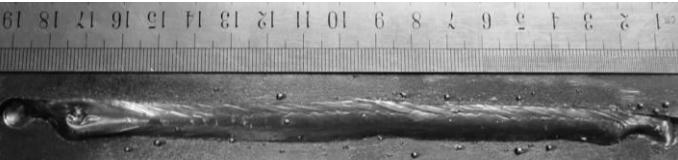
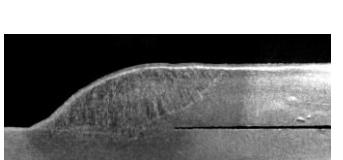
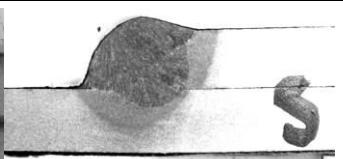
Vs (mm/s)	Aspecto visual	Seção transversal
Pulsado(+) -Pulsado(-)		
Pulsado(+) - Pulsado(+)		
Pulsado(+) -CCC(-)		

Figura 6.9 - Aparência visual e seção transversal dos cordões de solda feitos em junta sobreposta para três combinações a serem comparados

Em seu trabalho, Pessoa et al. (2006) estudaram a soldagem de chapas finas em junta

sobreposta com MIG/MAG CA e único arame e concluíram que com aumento da porcentagem da polaridade negativa a penetração cai (o valor máximo de penetração foi observado quando a porcentagem de CC- é nula). Entretanto, em outro trabalho Pessoa (2007), avaliou a soldagem MIG/MAG Duplo arame com um dos arames trabalhando no modo MIG/MAG CA. Para esta condição, o autor afirma que a variação da porcentagem de polaridade negativa na onda CA não tem influência sobre a penetração. Por outro lado, uma tendência parecida (maior penetração quanto a uso da polaridade negativa no arame seguidor) foi observada nas soldagens de passes de enchimento na posição plana (ver item 5.3).

Pode-se supor que na soldagem MIG/MAG Duplo Arame com polaridade negativa existam outros fenômenos responsáveis pela formação do cordão de solda, principalmente pelo valor da penetração. Uma hipótese seria a de que a interação do campo magnético entre os dois arcos (mesmo usando-se arcos curtos e distantes), que na combinação CC+-CC- passaria a concentrar mais campo entre os arco (ao contrário da combinação CC+-CC+), favorecesse esta maior penetração, o que não acontece com arco único.

Em relação aos outros parâmetros geométricos (reforço, largura e diluição) na soldagem MIG/MAG Duplo arame com corrente alternada o Pessoa (2007) observou os resultados parecidos com único arame (com aumento de % de polaridade negativa o reforço aumenta, mas a largura e diluição diminuem). Visualmente, a convexidade dos cordões de solda feitos com polaridade negativa (Pulsado(+)-Pulsado(-) e Pulsado(+)-CCC(-)) é maior do que a da polaridade positiva, Fig. 6.9. Segundo Tong et al. (2001) a convexidade aumenta como consequência de um arco mais frio e menor molhabilidade do metal líquido da poça de fusão.

Mas para o presente caso, acredita-se que, além disto, tal diferença tenha sido provocada pelas características dos arcos do Pulsado(-) e CCC(-). No caso o Pulsado(-), o arco permanece aberto ao longo de soldagem e no arco do CCC(-) apaga-se durante o curto-circuito, o que faz diferença em aquecimento do metal líquido e, consequente, sobre a molhabilidade.

Outra evidência que houve coincidência com os resultados discutidos na condição de soldagem de passe de enchimento na posição plana é o tamanho da ZAC, que é maior no caso da Pulsado(+)-Pulsado(+). Uma maior dimensão de ZAC a princípio indica maior energia de soldagem. Um dos motivos de se observar tal comportamento poderia ser a velocidade de soldagem, que no caso da Pulsado(+)-Pulsado(+) foi ligeiramente menor (ver Tab. 6.5). Mas de corrente contínua na polaridade negativa era mesmo de se esperar menor calor imposto.

Outra forma de se comparar os resultados é por uma avaliação econômica. A técnica Pulsado(+) - Pulsado(+) mostrou um aumento na velocidade limite de soldagem, o que permitiria menor tempo de operação para se fazer a mesma união. Além disto, a combinação Pulsado(+) - Pulsado(+) apresenta resultados relativamente bons em termos de eficiência de deposição (quase 96% de eficiência), sendo que os modos operacionais com polaridade negativa há uma perda do metal depositado na forma de respingos um pouco maior, como mostrado na Tab. 6.6. Porém, acredita-se que com uma regulagem mais rigorosa de parâmetros do Pulsado(-) e CCC(-) poderia reduzir a quantidade de respingos e melhorar o aspecto econômico desta combinação.

Tabela 6.6 - Dados típicos de características econômicas das combinações para realizarem cordões de mesmo volume

Combinação	Vs (mm/s)	Vat (m/min)	Eficiência de deposição (%)	Vazão do gás de proteção (l/min)
Pulsado(+) - Pulsado(+)	19,2	15,7	95,6	25
Pulsado(+) - Pulsado(-)	20,2	16,5	93,5	
Pulsado(+) - CCC(-)	20	16,6	92	

*Obs Vs = velocidade de soldagem; Vat = velocidade de alimentação total dos dois arames*

Mas, pode-se verificar que para confeccionar um mesmo cordão, com a mesma corrente média e o mesmo volume, precisa-se de mais material de adição em CC- do que em CC+ (devido a maior geração de respingos). Esta característica coloca o modo operacional Pulsado(+) - Pulsado(+) em vantagem.

Analizando-se a aparência visual dos cordões de solda apresentada nas Fig. 6.3, 6.6 e 6.7 pode-se verificar que a velocidade de soldagem limite para combinação Pulsado(+) - Pulsado(+) seria de 40 mm/s e a alcançável 50 mm/s. Nas soldagens com polaridade negativa não foi possível atingir velocidades de soldagem tão altas quanto a que foi alcançada pela condição padrão (Pulsado (+) - Pulsado (+)); para Pulsado(+) - Pulsado(-), a velocidade de soldagem limite seria de 25,4 mm/s e a alcançável de 30,5 mm/s e para Pulsado(+) - CCC(-) a velocidade limite seria de 25 mm/s e a alcançável 30 mm/s, como resumindo na Fig. 6.10. Fica claro que o envelope operacional, ou seja, a robustez é muito maior para a técnica padrão com o uso de Pulsado(+) - Pulsado(+) .

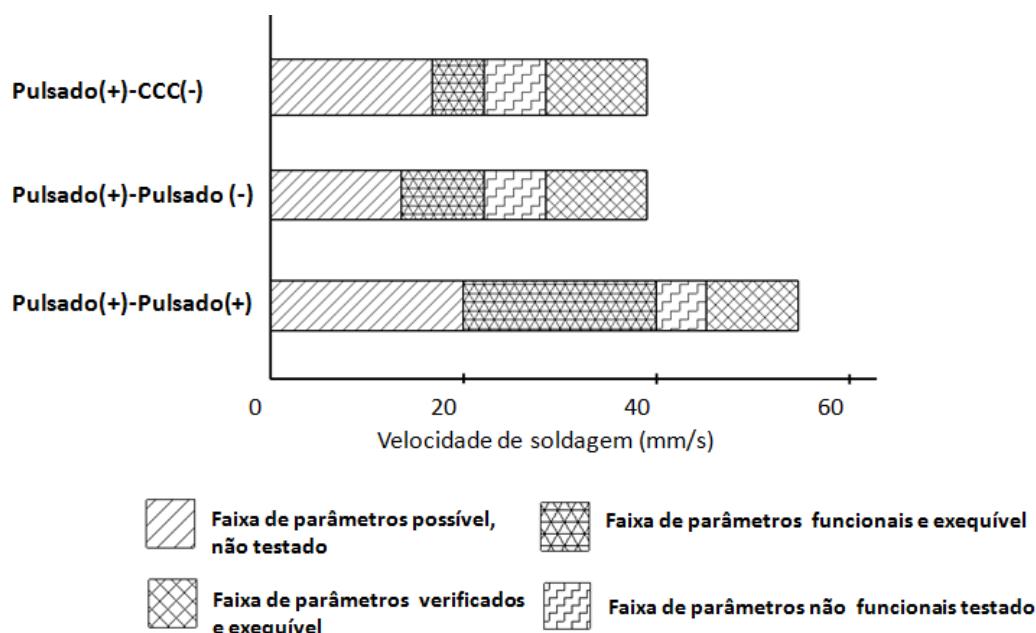


Figura 6.10 - Envelope operacional para cada combinação quanto à velocidade de soldagem para soldagens de chapas finas sobrepostas com uma mesma corrente média e quantidade de metal depositado

## **CAPITULO VII**

### **SOLDAGEM MIG/MAG DUPLO ARAME EM MÚLTIPLOS PASSES (MULTIPASSE) DE UMA JUNTA DE TOPO NA POSIÇÃO PLANA**

A união de chapas metálicas com espessuras grandes exige um procedimento especial, com soldagem em múltiplos passes. O que se geralmente procura na confecção de uma junta em múltiplos passes é rapidez de execução, uma boa fusão nas laterais e penetração e uma quantidade de metal depositado adequada. Nesse capítulo a condição de soldagem de um único passe de enchimento na posição plana (Capítulo V) será avaliada em uma nova condição, ou seja, na soldagem multifaces.

#### **7.1 - Preparação de placa de teste**

Para confecção de placa de teste nessa condição deve ser utilizada uma barra de espessura relativamente grande que na sua união precisaria uma preparação de chanfro e soldagem em múltiplos passes. Assim, para placa de teste foi escolhida uma barra de aço ao carbono ABNT 1020 de 19x57x200 mm e preparação de chanfro em V, Fig. 7.1. O ângulo de abertura de chanfro de 60° seria adequado para garantir o acesso da tocha de soldagem até o fundo da junta e garantir a proteção gasosa de primeiro passe.

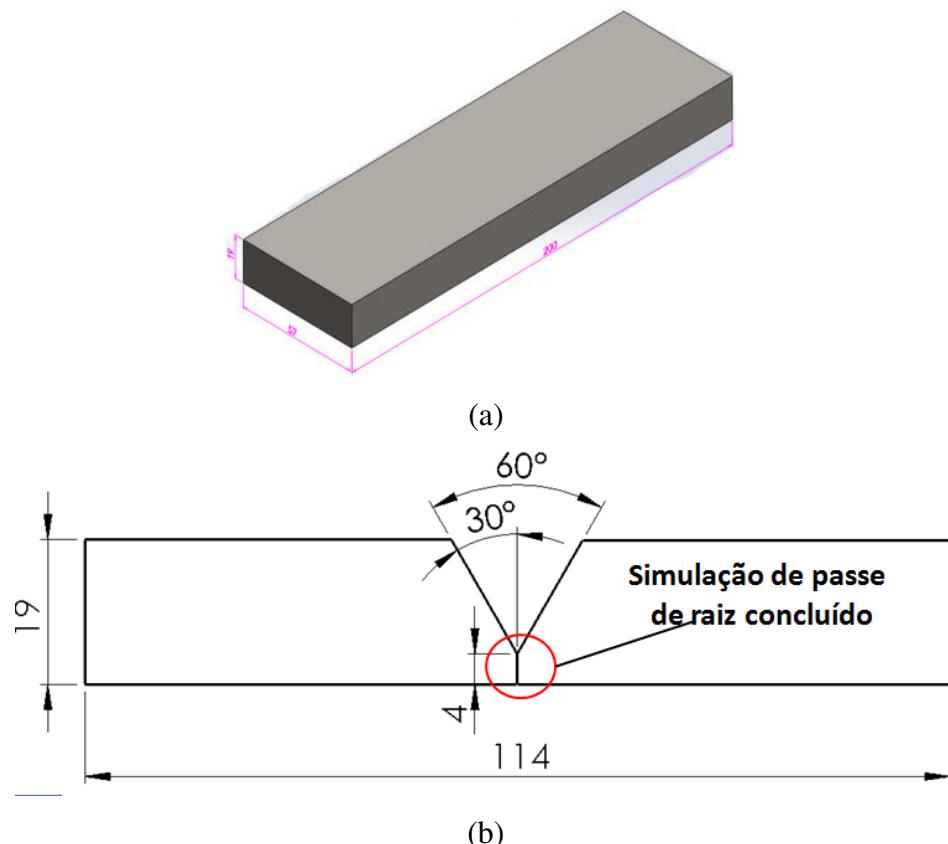


Figura 7.1 - Especificação de formato e dimensões da placa de teste em (a) barra chata utilizada na confecção de placas de teste e (b) detalhe de dimensões do chanfro

O procedimento de preparação de placa de teste não inclui a soldagem de passe de raiz sendo que um nariz de  $4+0,5$  mm seria adequado para sua simulação. Na confecção de chanfro foi utilizada uma fresadora eletromecânica e uma ferramenta de aço rápido de 22 mm de diâmetro. Os parâmetros de usinagem e aparência da ferramenta estão apresentados na Tab. 7.1. Ao final da operação de usinagem a placa chanfrada teve aparência apresentada na Fig. 7.2.



Figura 7.2 - Aparência do chanfro após a usinagem

Tabela 7.1 - Parâmetros de usinagem e ferramenta utilizados na confecção de chanfro para condição de soldagem multipasse

Formato de chanfro	Ferramenta	RPM	Velocidade de corte, (mm/min)	Ângulo entre eixo da ferramenta e a chapa	Profundidade de passe (mm)	Quantidade de passes
		360	35	30°	1	10-12

## 7.2 - Posicionamento da tocha em relação à placa de teste e considerações gerais

O objetivo geral de se fazer uma soldagem de múltiplos passes seria a avaliação das técnicas de soldagem MIG/MAG Duplo Arame com arame-seguidor trabalhando em polaridade negativa quanto à presença de descontinuidades (falta de fusão nas paredes do chanfro ou entre os passes, porosidade, etc.). Deste modo a obtenção de uma junta completa com preenchimento total não foi o foco principal. Assim, decidiu se fazer apenas quatro passes em cada combinação, considerando essa quantidade como suficiente para avaliar o desempenho das combinações nesta condição de soldagem.

De um modo ou de outro, não seria muito difícil de soldar um ou dois passes de acabamento com parâmetros diferentes para obter uma boa aparência visual do cordão de solda e enchimento completo da junta, mas isso poderia interferir nos resultados o que não seria admissível quando se deseja efetuar um estudo comparativo.

Nesta condição de soldagem foi utilizada a tocha modelo 2, que foi posicionada no meio do chanfro, conforme Fig. 7.3 (a). O ângulo de trabalho e ângulo de ataque foram de 90°, como especificado na Fig. 7.3 (c). Inicialmente mediu-se a distância bico de contato-peça conforme a Fig. 7.3 (a) e após a soldagem de cada passe conforme a Fig. 7.3 (b).

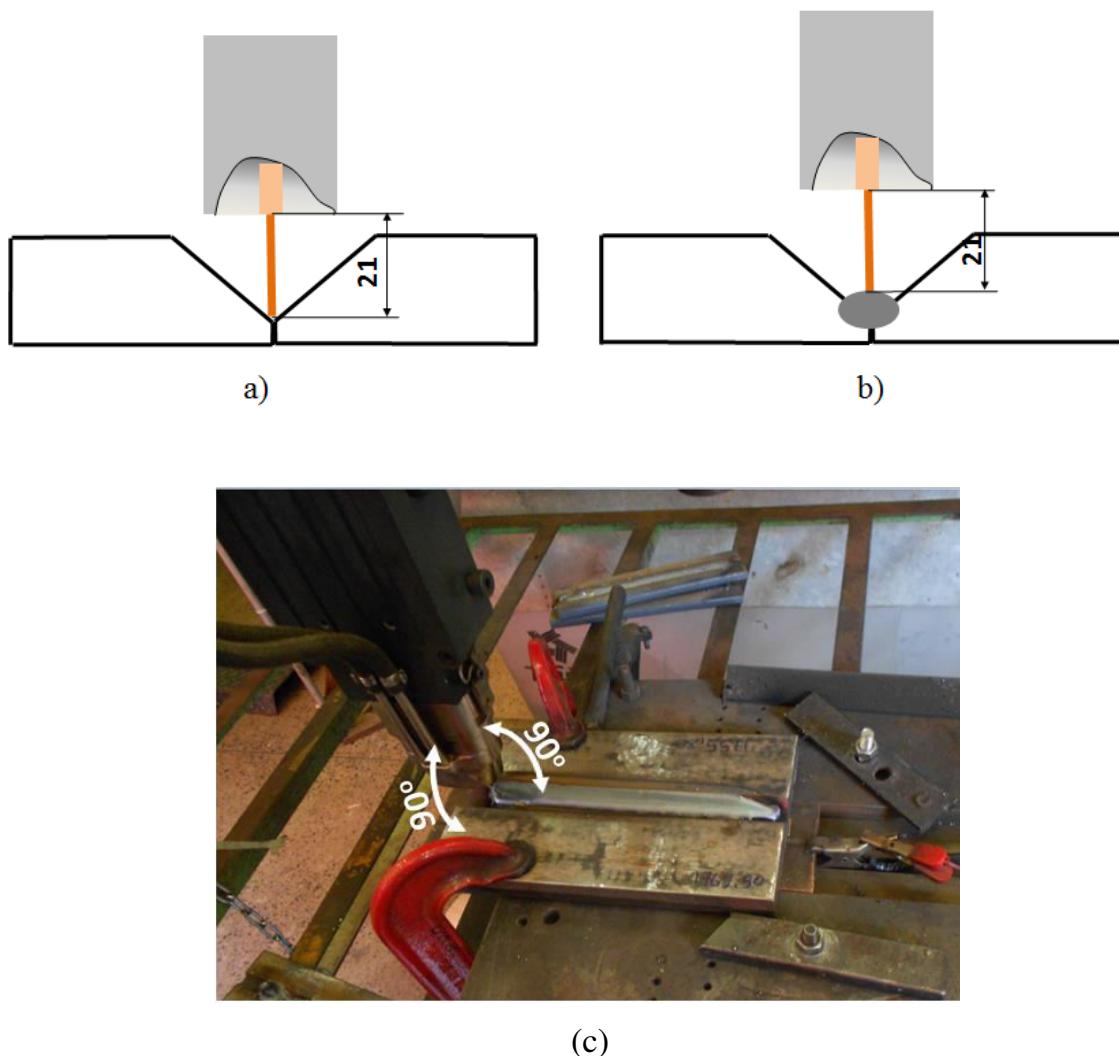


Figura 7.3 - Posicionamento da tocha de soldagem em relação aplaca de teste: em (a) - detalhe de medição de distância bico de contato-peça no primeiro passe; (b) - medição de distância bico de contato peça nos passes posteriores; e (c) - detalhe quanto a ângulo de trabalho e ângulo de ataque.

Os passes foram feitos com velocidades de soldagem encontradas no Capítulo V (Soldagem de passe de enchimento em único passe na posição plana), que correspondem o enchimento completo do chanfro. Após o primeiro passe, cada passe seguinte foi feito com pelo menos 1/3 de sobreposição com o passe anterior para garantir a fusão completa entre eles. A limpeza entre os passes foi efetuada manualmente, com auxílio de escova de aço. Com intuito de não alterar o tamanho da zona afetada pelo calor, optou-se depois de cada passe deixar a placa de teste resfriar até a temperatura do ambiente (aproximadamente 25 a 30°C). Para agilizar o resfriamento, utilizou-se apenas o ar comprimido.

### 7.3 - Resultados

Por ter os oscilogramas típicos de corrente e tensão parecidos com os encontrados na condição de soldagem de passes de enchimento na posição plana, decidiu-se não repetir os mesmos em cada combinação e apresentar apenas os parâmetros de soldagem regulados e monitorados.

#### 7.3.1 - Soldagem com combinação Pulsado(+) - Pulsado(+)

As variáveis de regulagem e monitorados ao se usar a combinação Pulsado(+) - Pulsado(+) estão apresentados na Tab. 7.2.

Tabela 7.2 - Variáveis de regulagem e monitorados ao se usar a combinação Pulsado(+) - Pulsado(+)

Variáveis de regulagem						
Arame	Ip (A)	Ib (A)	tp (ms)	tb (ms)	Va (m/min)	Vs (mm/s)
Líder Pulsado(+)	350	250	3,5	8	10,3	7
Seguidor Pulsado(+)	350	100	3,5	8	4,4	
Variáveis monitoradas						
Arame	Ip (A)	Ib (A)	tp (ms)	tb (ms)	Va (m/min)	Vs (mm/s)
Líder Pulsado(+)	341	242,3	3,4	8	9,7	6,8
Seguidor Pulsado(+)	340	100,7	3,4	8	4,6	

Obs **Ip**=corrente de pulso; **Ib**=corrente de base; **tp**=tempo de pulso; **tb**=tempo de base; **Vs**=velocidade de soldagem; **Va**=velocidade de alimentação do arame

Na Fig. 7.4 encontram-se a aparência visual do cordão de solda feito utilizando a combinação Pulsado(+) - Pulsado(+) e sua respectiva seção transversal.



Figura 7.4 - Aspecto visual e seção transversal do cordão de solda feito em múltiplos passes ao se usar a combinação Pulsado(+) - Pulsado(+)

### 7.3.2 - Soldagem com combinações Pulsado(+) - Pulsado(-) e Pulsado(+) - CCC(-)

As variáveis de regulagem e adquiridos quando se usar a combinação Pulsado(+) - Pulsado(-) estão apresentadas na Tab. 7.3.

Tabela 7.3 - Variáveis de regulagem e monitorados ao se usar a combinação Pulsado(+) - Pulsado(-)

Variáveis de regulagem						
Arame	Ip (A)	Ib (A)	tp (ms)	tb (ms)	Va (m/min)	Vs (mm/s)
Líder Pulsado(+)	366	255	3,5	8	10,3	8,4
Seguidor Pulsado(-)	-350	-98	3,5	8	7,7	
Variáveis monitoradas						
Arame	Ip (A)	Ib (A)	tp (ms)	tb (ms)	Va (m/min)	Vs (mm/s)
Líder Pulsado(+)	349	250	3,6	8,2	9,7	8,2
Seguidor Pulsado(-)	-326	-96,7	3,4	8	7,3	

Obs **Ip**=corrente de pulso; **Ib**=corrente de base; **tp**=tempo de pulso; **tb**=tempo de base; **Vs**=velocidade de soldagem; **Va**=velocidade de alimentação do arame; **Im**=corrente média

A aparência visual do cordão de solda feito com combinação Pulsado(+) - Pulsado(-) e sua seção transversal estão apresentadas na Fig. 7.5

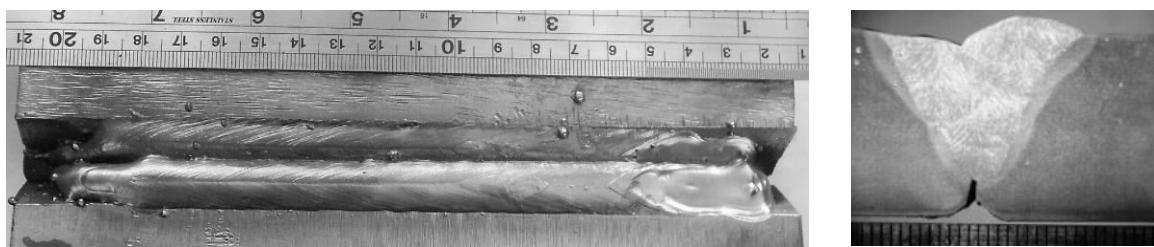


Figura 7.5 - Aspecto visual e seção transversal do cordão de solda feito em múltiplos passos ao se usar a combinação Pulsado(+) - Pulsado(-)

De maneira semelhante com os demais capítulos, as variáveis de regulagem e monitoradas ao se soldar com Pulsado(+) - CCC(-) estão apresentadas nas duas tabelas diferentes Tab. 7.4 e Tab. 7.5.

Tabela 7.4 - Variáveis<sup>(\*)</sup> de regulagem ao se usar a combinação Pulsado(+) - CCC(-)

Variáveis do Líder Pulsado(+)											
Ip (A)		Ib (A)		Tp (ms)		tb (ms)		Va (m/min)		Vs (mm/s)	
366		255		3,5		8		10,3			
Variáveis do Seguidor CCC(-)											
Ia1 (A)	Ia2 (A)	ta1 (ms)	ta2 (ms)	Ic1 (A)	Ic2 (A)	tc1 (ms)	tc2 (ms)	Ic3 (A)	Ia3 (A)	8,5	
-320	-210	2	3	-95	-105	0,5	0,6	-224	-160		
tr1 (ms)	tr2 (ms)	kr	di3 (A/ms)	Ucc (V)	Va (m/min)						
0,6	0,6	1,8	120	-10	7,9						

(\*) o significado das variáveis está apresentado no Item 4.1 (para pulsado) e Item 4.3 (para CCC), no Capítulo 4 (Definição dos Parâmetros de Soldagem)

Tabela 7.5 - Variáveis<sup>(\*)</sup> monitorados ao se usar a combinação Pulsado(+) - CCC(-)

Variáveis do Líder Pulsado(+)											
Ip (A)		Ib (A)		tp (ms)		tb (ms)		Va (m/min)		Vs (mm/s)	
354,2		245,7		3,4		8,2		9,7			
Variáveis do Seguidor CCC(-)											
Ia1 (A)	Ia2 (A)	ta1 (ms)	ta2 (ms)	Ic1 (A)	Ic2 (A)	tc1 (ms)	tc2 (ms)	Ic3 (A)	Ia3 (A)	8,3	
-295	-210	2,2	3,6	-99	-110	0,6	0,6	-225,5	-153,2		
tr1 (ms)	tr2 (ms)	kr	di3 (A/ms)	Ucc (V)	Va (m/min)						
0,6	0,4	1,8	120	-10	7,5						

(\*) o significado das variáveis está apresentado no Item 4.1 (para pulsado) e Item 4.3 (para CCC), Capítulo 4 (Definição dos Parâmetros de Soldagem Definição)

Na Fig. 7.6 estão apresentadas a aparência visual do cordão de solda feito com combinação Pulsado(+) - CCC(-) e sua seção transversal



Figura 7.6 - Aspecto visual e seção transversal do cordão de solda feito em múltiplos passes ao se usar a combinação Pulsado(+) - CCC(-)

#### 7.4 - Discussão dos resultados

Em relação à aparência visual, todos os cordões apresentaram um bom aspecto porem ao se observar os últimos passes dos cordões feitos com combinações Pulsado(+) - Pulsado(-) e Pulsado(+) - CCC(-) percebe-se uma maior convexidade. Na análise macrográfica, todas as combinações também foram aprovadas, pois não apresentaram descontinuidades graves e detectáveis a olho nu. Os aspectos visuais e as seções transversais dos cordões de solda são repetidos na Fig. 7.7.

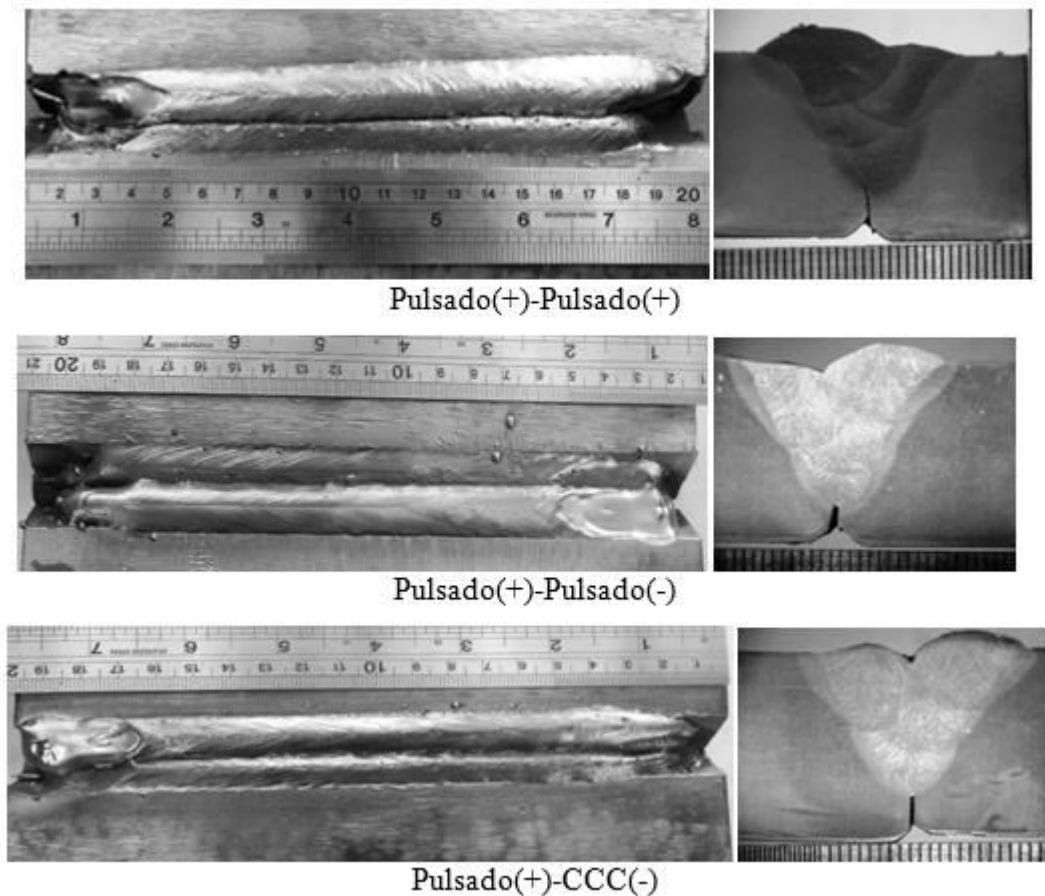


Figura 7.7 - Aparência visual e seção transversal dos cordões de solda feitos em múltiplos passes para as três combinações a serem comparadas

As corrente e tensão médias com seus respectivos valores eficazes estão apresentadas na Tab. 7.7. Pode-se observar as mesmas tendências observadas na condição de soldagem de passes de enchimento em um único passe, ou seja, aumento da taxa de fusão do arame eletrodo em polaridade negativa para uma mesma corrente média e consequente aumento de velocidade de soldagem. Entretanto a eficiência de deposição para as combinações com polaridade negativa continua sendo relativamente baixa, como resumindo na Tab. 7.6.

Tabela 7.6 - Dados típicos de eficiência de deposição das combinações avaliadas na soldagem de passes de enchimento em múltiplos passes

Combinação	Eficiência de deposição
Pulsado(+) - Pulsado(+)	96,5
Pulsado(+) - Pulsado(-)	93,5
Pulsado(+) - CCC(-)	94

Tabela 7.7 - Valores dos parâmetros monitorados para três combinações na soldagem de passe de enchimento em múltiplo- passes

Combinação	Arame	Im (A)	Um (V)	Irms (A)	Urms (V)	Va (m/min)	Vat (m/min)	Vs (mm/s)	Q (g/m)
Pulsado(+) - Pulsado(+)	Líder	284,0	25,6	288	26,0	9,7	14,3	6,8	311,0
	Seguidor	183,7	20,0	217,5	20,7	4,6			
Pulsado(+) - Pulsado(-)	Líder	282	27,4	286,5	27,6	9,7	17,0	8,2	308,5
	Seguidor	-170	-23	199,2	24,5	7,3			
Pulsado(+) - CCC(-)	Líder	287,3	25,8	292	26,2	9,7	17,2	8,3	312,0
	Seguidor	-187	-18	200	19,8	7,5			

Obs **Im**=corrente média; **Um** = tensão média; **Irms** = corrente eficaz; **Urms** = tensão eficaz; **Va** = velocidade de alimentação do arame para cada eletrodo; **Vat** = velocidade de alimentação total dos dois arames; **Q** = quantidade de metal depositado por unidade de comprimento

Os parâmetros geométricos dos cordões de solda estão apresentados na Fig. 7.8.

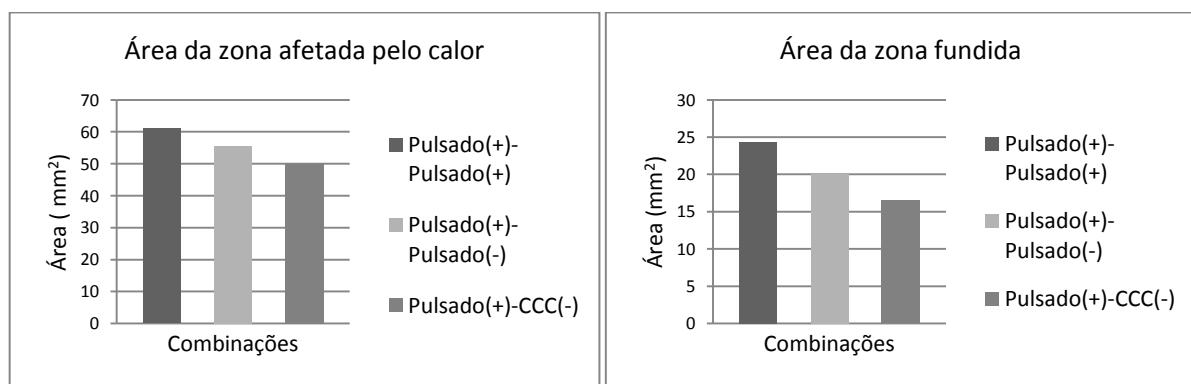


Figura 7.8 - Parâmetros geométricos de cordões de solda feitos com três combinações ao se soldar na condição de soldagem multipasse na posição plana

De modo geral os resultados obtidos na condição de soldagem multipasse estão em boa concordância com os resultados obtidos nas outras condições (soldagem de passe de enchimento e soldagem de chapa fina). Analisando os diagramas apresentados na Fig. 7.7

podemos ver que os cordões de solda feitos com polaridade negativa apresentaram menor zona afetada pelo calor e menor área fundida que, como foi mostrado nos capítulos anteriores são as características típicas de cordões de solda feitos com polaridade negativa. Inicialmente, esperou-se que as soldagens com combinações Pulsado(+) - Pulsado(-) e Pulsado(+) - CCC(-) apresentarão defeitos, principalmente falta de fusão entre os passes e nas laterais devido à alta convexidade dos cordões de solda e o arco mais "frio". Entretanto, nada disso foi observado e os cordões de solda não apresentaram qualquer defeito, provando a possibilidade de se soldar com MIG/MAG Duplo Arame em polaridade negativa.

## **CAPITULO VIII**

### **SOLDAGEM DE PASSE DE ENCHIMENTO EM ÚNICO PASSE NA POSIÇÃO SOBRE CABEÇA**

A soldagem fora de posição sempre foi aliada com dificuldades na transferência metálica e formação do cordão de solda. Recentemente os modos operacionais com controle de transferência metálica facilitam a soldagem fora de posição através de um melhor controle da poça de fusão e uma maior flexibilidade dos parâmetros de soldagem. Nesse capítulo foi feita uma avaliação de possibilidade de se aplicar a soldagem MIG/MAG Duplo Arame (MIG/MAG DA) na soldagem de passes de enchimento na posição sobrecabeça empregando modos Pulsado e curto-circuito controlado em polaridade negativa visando o aumento da produtividade mantendo controle sobre a poça de fusão.

#### **8.1 - Preparação de placa de teste e posicionamento da tocha de soldagem**

As placas de teste para soldagem de passe de enchimento na posição sobrecabeça foram feitas da mesma maneira que na posição plana (ver Capítulo V, Item 5.1 - Preparação de placas de teste para soldagem). A tocha de soldagem foi posicionada perpendicularmente à placa de teste, usando-se para tal um suporte especial feito para soldagem na posição sobrecabeça, Fig. 8.1.

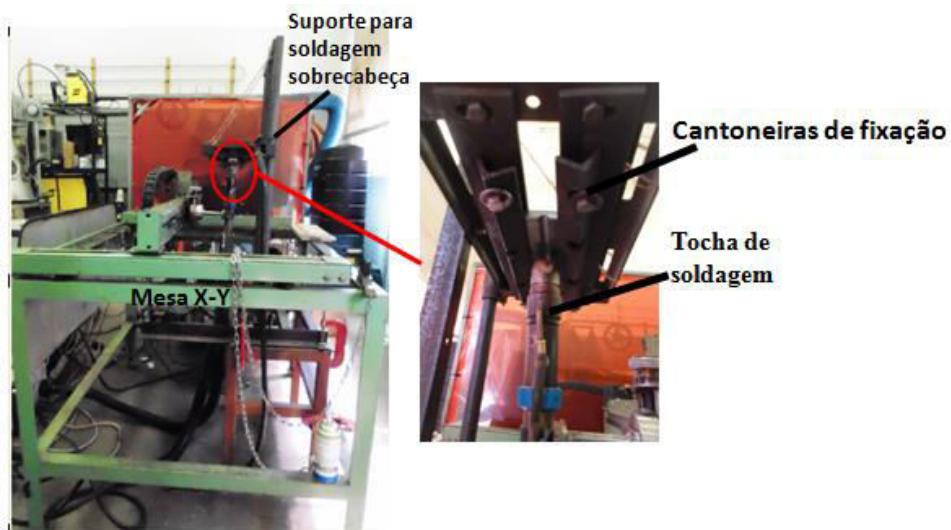


Figura 8.1 - Apresentação do suporte para fixação de placa de teste ao se soldar passe de enchimento na posição sobrecabeça

Os arames foram alinhados no centro do chanfro e a distância bico de contato-peça (DBCP) de 21 mm foi medida de acordo com o esquema apresentado na Fig. 8.2

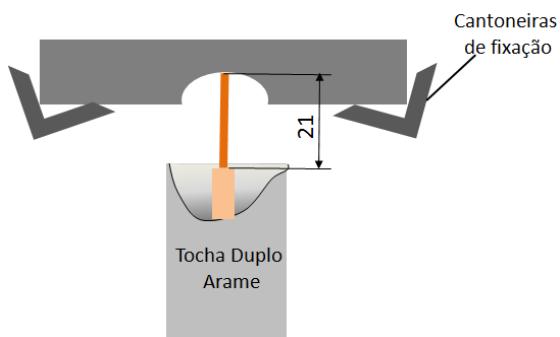


Figura 8.2 - Esquematização da medição de distância bico de contato-peça (DBCP) e posicionamento da tocha em relação à placa de teste para condição de soldagem de passes de enchimento na posição sobrecabeça

A tocha de soldagem utilizada nessa condição foi a modelo 1, com arames paralelos e afastados um do outro a uma distância de 10 mm.

## 8.2 - Resultados

Os parâmetros de soldagem permaneceram os mesmos dos encontrados para a condição de soldagem de passes de enchimento na posição plana (Capítulo V Item 5.2 Resultados).

### 8.2.1 Soldagem com combinação Pulsado(+) - Pulsado(+)

As variáveis de regulagem e monitorados estão apresentadas na Tab. 8.1. Os oscilogramas típicos de corrente e tensão estão apresentadas na Fig. 8.4. A velocidade de soldagem foi aumentada progressivamente para se encontrar os limites operacionais desta técnica na condição de soldagem de passe de enchimento sobrecabeça.

Tabela 8.1 - Variáveis<sup>(\*)</sup> de regulagem e monitorados na soldagem de passes de enchimento com combinação Pulsado(+) - Pulsado(+) na posição sobrecabeça

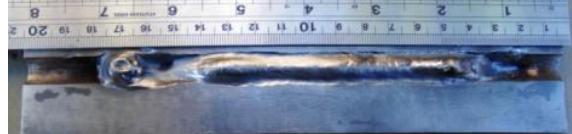
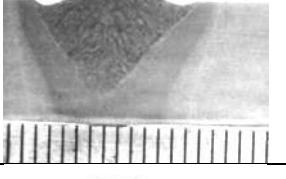
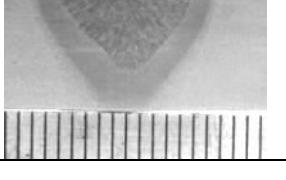
Variáveis de regulagem						
Arame	Ip (A)	Ib (A)	tp (ms)	tb (ms)	Va (m/min)	Im (A)
Líder	350	250	3,5	8	9,2	280
Seguidor	350	100	3,5	8	5,8	180

Variáveis monitoradas									
Arame	Ip (A)	Ib (A)	tp (ms)	tb (ms)	Va (m/min)	Im (A)	Um (V)	Irms (A)	Urms (V)
Líder	346,8	249,5	3,8	8	9,6	272	26,8	276,6	27,1
Seguidor	342,4	96,7	3,2	7,8	5,5	173	24,2	205,6	24,8

Obs **Ip**=corrente de pulso; **Ib**=corrente de base; **tp**=tempo de pulso; **tb**=tempo de base; **Vs**=velocidade de soldagem; **Va**=velocidade de alimentação do arame; **Im**=corrente média

Na Fig. 8.3 estão apresentados o aspecto visual dos cordões de solda resultantes e suas respectivas seções transversais.

Vs (mm/s)	Aspecto superficial	Seção transversal
8,8		
10,7		

12,7		
15,6		
19,5		
35,3		
39,0		
43,8		

*Obs Vs = velocidade de soldagem monitorada*

Figura 8.3 - Aspecto visual dos cordões de solda e suas seções transversais feitos em um único passe na posição sobre cabeça ao se usar a combinação Pulsado(+) - Pulsado(+)

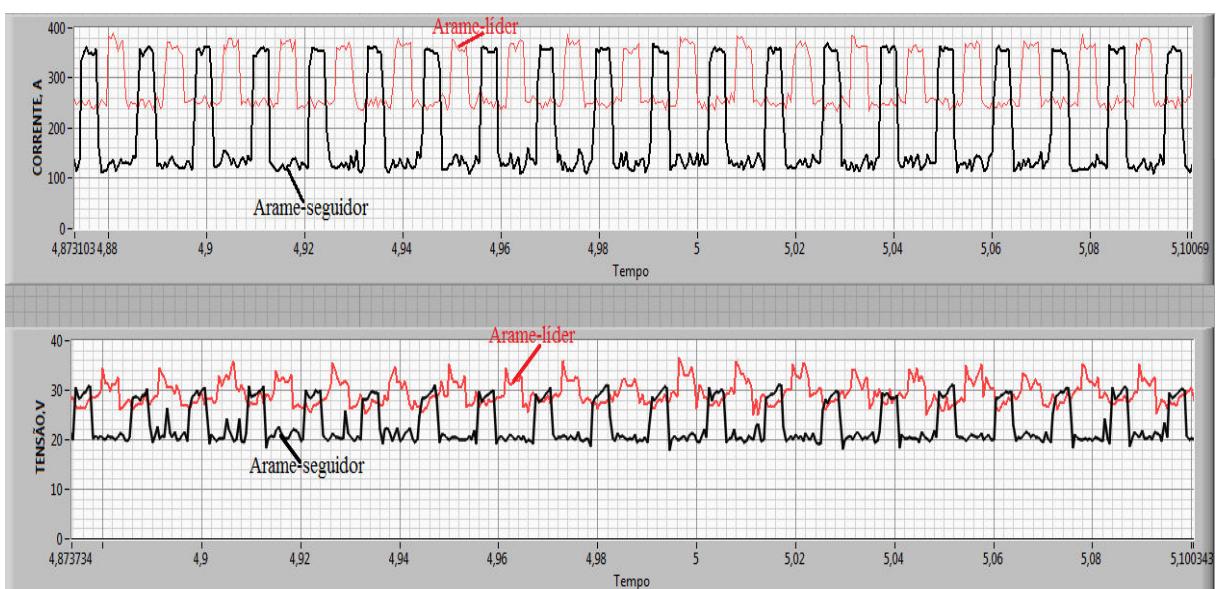


Figura 8.4 - Oscilogramas típicos de corrente e tensão ao se soldar com combinação Pulsado(+) - Pulsado(+)

### 8.2.2 - Soldagem com combinação Pulsado(+) - Pulsado(-)

As variáveis de regulagem e monitoradas ao se soldar com a combinação Pulsado(+) - Pulsado(-) estão apresentadas na Tab. 8.2, enquanto uma amostra típica do oscilograma dos sinais de corrente e tensão está apresentada na Fig. 8.5 e o cordão de solda resultante encontra-se ilustrado na Fig. 8.6. Pode-se perceber uma grande instabilidade e irregularidade dos sinais elétricos pelo oscilograma (nem sempre mantendo a pulsação imposta), o que pode justificar o cordão realizado totalmente sem continuidade.

Tabela 8.2 - Variáveis<sup>(\*)</sup> de regulagem e monitorados na soldagem de passes de enchimento com combinação Pulsado(+) - Pulsado(-) na posição sobrecabeça

Variáveis de regulagem						
Arame	Ip (A)	Ib (A)	tp (ms)	tb (ms)	Va (m/min)	Im (A)
Líder	350	250	3,5	8	10,3	280
Seguidor	-350	-98	3,5	8	7,7	-180
Variáveis monitoradas						
Arame	Ip (A)	Ib (A)	tp (ms)	tb (ms)	Va (m/min)	Im (A)
Líder	359,8	250,1	3,6	8	9,6	282,8
Seguidor	-302,2	-91,4	3,4	7,8	7,3	-174,2
Arame	Ip (A)	Ib (A)	tp (ms)	tb (ms)	Va (m/min)	Um (V)
Líder	359,8	250,1	3,6	8	9,6	27,3
Seguidor	-302,2	-91,4	3,4	7,8	7,3	-21,8
Arame	Ip (A)	Ib (A)	tp (ms)	tb (ms)	Va (m/min)	Irms (A)
Líder	359,8	250,1	3,6	8	9,6	204,8
Seguidor	-302,2	-91,4	3,4	7,8	7,3	22,7

Obs **Ip**=corrente de pulso; **Ib**=corrente de base; **tp**=tempo de pulso; **tb**=tempo de base; **Vs**=velocidade de soldagem; **Va**=velocidade de alimentação do arame; **Im**=corrente média

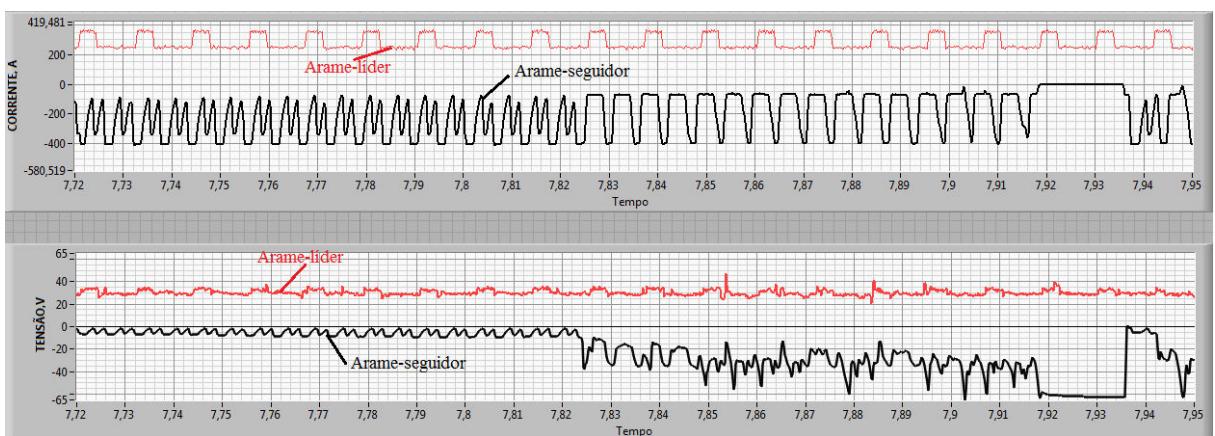


Figura 8.5 - Oscilogramas típicos de corrente e tensão ao se soldar com combinação Pulsado(+) - Pulsado(-)



Figura 8.6 - Aspecto visual do cordão de solda feito na combinação Pulsado(+) - Pulsado(-), posição sobrecabeça

### 8.2.3 - Soldagem com combinação Pulsado(+) - CCC(-)

Por mostrar resultados inaceitáveis na soldagem sobrecabeça com Pulsado(+) - Pulsado(-), procurou-se fazer experimentos com um único arame trabalhando no modo CCC(-). Por hipóteses, a soldagem com CCC(-) na posição sobrecabeça deveria apresentar vantagens em função de sua transferência metálica controlável e menor calor transferido para a peça. As variáveis de regulagem ao se soldar com único arame em CCC(-) estão apresentadas na Tab. 8.3, enquanto os seus valores monitorados estão apresentados na Tab. 8.4. Os oscilogramas típicos da tensão e corrente adquiridos durante a soldagem com único arame em CCC(-) estão apresentados na Fig. 8.7.

Tabela 8.3 - Variáveis<sup>(\*)</sup> de regulagem ao se soldar com um único arame trabalhando em CCC(-) na posição sobrecabeça

Ia1 (A)	Ia2 (A)	ta1 (ms)	ta2 (ms)	Ic1 (A)	Ic2 (A)	tc1 (ms)	tc2 (ms)	Ic3 (A)	Ia3 (A)
-320	-210	2	3	-95	-105	0,5	0,6	-224	-120
tr1 (ms)	tr2 (ms)	kr	di3 (A/ms)	Ucc (V)	Va (m/min)	Im almejado (A)			
0,6	0,6	1,8	-160	-10	7,9	-180			

(\*) o significado das abreviaturas das variáveis está apresentado no título da Fig. 4.2 do Capítulo 4 (Definição de parâmetros de soldagem)

Tabela 8.4 - Variáveis<sup>(\*)</sup> monitorados ao se soldar com um único arame trabalhando em CCC(-) na posição sobrecabeça

Ia1 (A)	Ia2 (A)	ta1 (ms)	ta2 (ms)	Ic1 (A)	Ic2 (A)	tc1 (ms)	tc2 (ms)	Ic3 (A)	Ia3 (A)
-304	-203	2	3,8	-99,4	-103	0,6	0,8	-266,1	-157
tr1 (ms)	tr2 (ms)	kr	di3 (A/ms)	Ucc (V)	Va (m/min)	Im (A)	Irms (A)	Um (V)	Urms (V)
0,6	0,6	1,8	140	10	7,5	-172	181,6	-22,2	23,2

(\*) o significado das abreviaturas das variáveis está apresentado no título da Fig. 4.2 do Capítulo 4 (Definição de parâmetros de soldagem)



Figura 8.7 - Oscilogramas típicos adquiridos durante a soldagem com CCC(-) e único arame (Corrente média 180 A)

Como se pode notar pela Fig. 8.7 e 8.8, mesmo com um único cordão a condição paramétrica não permitiu a soldagem sobrecabeça com CCC na polaridade negativa, ao contrário do que tinha sido conseguido na posição plana (Capítulos V, VI e VII). Por não apresentar os resultados aceitáveis na soldagem com corrente 180 A, decidiu-se, de forma exploratória, diminuir a corrente para 140 A e soldar com velocidades mais baixas. Os

cordões de solda resultantes estão apresentados na Fig. 8.9. Nesse caso não foi feita a aquisição de dados.

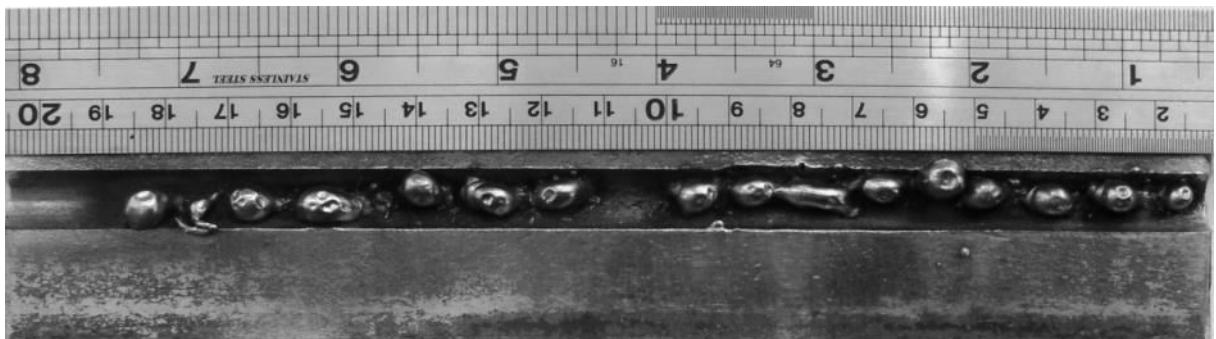


Figura 8.8 - Aspecto visual do cordão de solda ao se soldar com um único arame trabalhando em CCC(-) na posição sobrecabeça (corrente média almejada de 180 A)

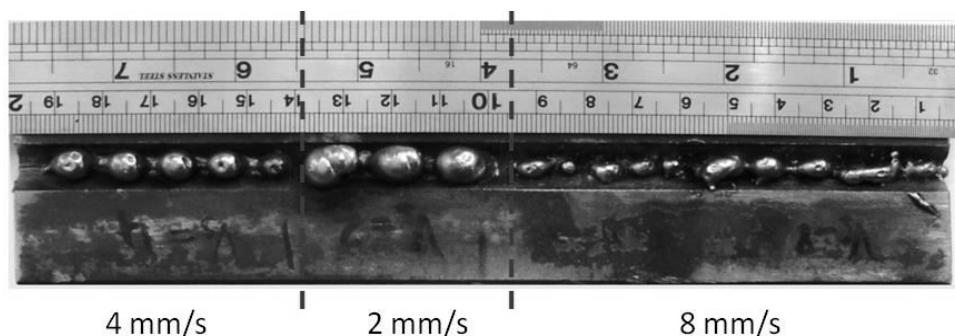


Figura 8.9 - Aspecto visual dos cordões de solda feito com um único arame trabalhando em CCC(-) em diferentes velocidades de soldagem (corrente média almejada de 140 A)

Em função dos resultados, optou-se por parar os ensaios com polaridade negativa na posição sobrecabeça, tanto na condição Pulsado(+)–Pulsado(–) como na condição Pulsado(+)–CCC(–). Além disto, foi observado durante a soldagem que uma quantidade significativa de gotas de metal líquido caia dentro da tocha, com perigo de se fazer um curto-círcuito entre os eletrodos e danificar a tocha.

### 8.3 - Discussão dos resultados

Na condição de soldagem de passes de enchimento na posição sobrecabeça, somente a combinação Pulsado(+)–Pulsado(+) apresentou resultados aceitáveis, mostrando um grande envelope operacional em relação à velocidade de soldagem, aparência visual e seção

transversal do cordão de solda. A Fig. 8.10 apresenta esse mapa operacional.

Analizando as seções transversais dos cordões de solda (Fig. 8.4) percebe-se que com aumento da velocidade de soldagem a tendência de poça de fusão escorrer diminui a sua intensidade. Tal efeito é relacionado com decréscimo da energia de soldagem e resfriamento da poça de fusão mais rápido o que impede o escorregamento.

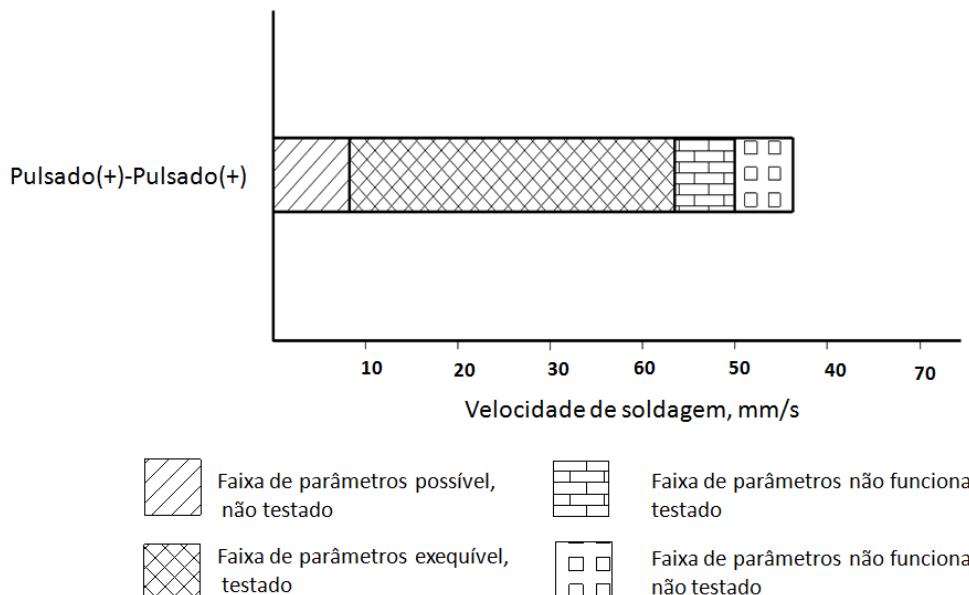


Figura 8.10 - Envelope operacional de velocidades de soldagem para a combinação Pulsado(+) - Pulsado(+) ao se soldar passe de enchimento em um único passe na posição sobre cabeça

As tentativas de se soldar com Pulsado(+) - Pulsado(-) e Pulsado(+) - CCC(-) na posição sobre cabeça não mostrou resultados aceitáveis nas condições testadas. Por princípio, o uso dos modos Pulsado e CCC na polaridade negativa deveriam facilitar a soldagem fora de posição plana, devido ao controle da transferência metálica que apresenta cada modo operacional. Entretanto, mesmo mantendo um arco o mais curto possível, aparentemente não se conseguiu evitar a formação de gotas relativamente grandes, com consequente instabilidade no arco, não sendo possível, então, prevenir uma ação predominante da ação da força de gravidade contra a transferência metálica, em detrimento da ação da força devido à tensão superficial. Sem tocar a poça de fusão, a gota continua crescendo até que a gravidade supere as forças eletromagnéticas a gota vai cair, como esquematiza a Fig. 8.11 por analogia com o uso de um conta-gotas.

Algumas evidências práticas foram encontradas para a explicação dada no parágrafo anterior. No caso da soldagem com Pulsado(+) - Pulsado(-), a gota mal atinge a poça de fusão,

caindo dentro do bocal. Tal efeito foi observado logo após a soldagem, como ilustrado na Fig. 8.12. Pode-se observar que a gota começa escorrer para baixo ainda permanecendo na ponta do eletrodo. Desta maneira a maioria das gotas de soldagem caiu dentro do bocal danificando o difusor de gás e o porta-bico, Fig. 8.13.

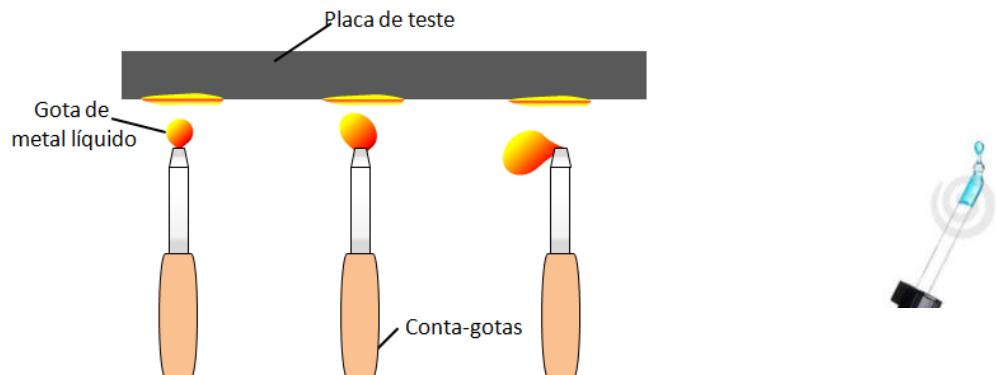


Figura 8.11 - Esquematização de um modelo da transferência metálica em soldagem com CCC(-)/Pulsado(-) na posição sobre-cabeça por analogia com um conta-gotas



Figura 8.12 - Aparência da ponta do arame após a soldagem com Pulsado(+) - CCC(-) na posição sobre-cabeça

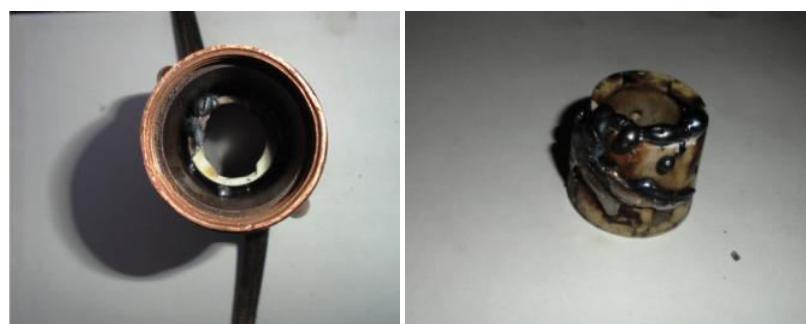


Figura 8.13 - Aparência do bocal e do difusor de gás após a soldagem na posição sobre-cabeça

com combinações Pulsado(+) - Pulsado(-) e Pulsado(+) - CCC(-)

Apesar de ser um modo de transferência metálica controlável, nas condições de avaliação o CCC em polaridade negativa não provou a sua eficiência. A tentativa de diminuir a corrente média também não fez muito efeito em termos de estabilidade do processo e formação do cordão de solda. Entretanto, observando a Fig. 8.9, pode-se dizer que a transferência metálica ocorreu (provavelmente com uma corrente média menor a gota também diminui e o efeito explicado na figura acima não é tal pronunciado) mas o "cordão" resultante fica na forma de uma bolha, que aumenta o seu tamanho quando a velocidade de soldagem diminui (Fig. 8.9 com cordão de solda feito com CCC(-) com várias velocidades de soldagem).

## CAPITULO IX

### CONCLUSÕES

Considerando que o objetivo geral desse trabalho foi avaliar o uso da polaridade negativa em soldagens de passes de enchimento pelo processo MIG/MAG Duplo Arame comparativamente à forma convencional (pulsado CC+ nos dois arames), pode-se afirmar que, nas condições específicas deste trabalho (corrente média de 280 A no arame-líder e 180 A no arame-seguidor, mesmo volume de metal depositado por unidade de comprimento de solda, sobre chapa de aço carbono e com os equipamentos utilizado), a polaridade negativa no arame-seguidor melhora o desempenho do processo por:

- aumentar a taxa de fusão para uma mesma corrente média, o que pode ser traduzido em uma velocidade de soldagem maior para se fazer o mesmo cordão de solda;
- diminuir o calor imposto (velocidade de soldagem maior), o que resulta em uma ZAC e área fundida menores;
- aumentar a penetração do cordão de solda;

Mas ao mesmo tempo:

- reduzir o envelope operacional em relação à velocidade de soldagem;
- aumentar a quantidade de respingos (diminuir eficiência de deposição)

Também se pode concluir que nas condições de avaliação o uso do modo operacional CCC(-) trás vantagens sobre o do Pulsado(-) em termos de estabilidade (maior controle sobre o processo e menos respingos). Porém os cordões fetos com Pulsado(+)Pulsado(-) levam à uma menor convexidade comparados com os do Pulsado(+)CCC(-).

Quanto à soldagem fora de posição plana, as combinações Pulsado(+)Pulsado(-) e Pulsado(+)CCC(-) não mostraram sua viabilidade. Entretanto, os resultados aceitáveis foram obtidos na soldagem de chapa fina em junta sobreposta e de passe de enchimento na posição plana, tanto em um único passe quanto em múltiplos.

Assim, a polaridade negativa no arame-seguidor na soldagem com MIG/MAG Duplo Arame mostra potencialidade de ser utilizada na confecção de passes de enchimento e união de chapas finas na posição plana, mas a combinação convencional Pulsado(+) - Pulsado(+) trás vantagens em termos de flexibilidade, robustez e estabilidade do processo.

*Obs: Deve-se destacar que, principalmente quando ao uso da condição CCC(-), os resultados são muito dependentes do equipamento utilizado. Como se sabe, não é uma prática comum usar a polaridade negativa em CCC e o equipamento usado não é dedicado a este tipo de operação. Assim, uma parametrização mais sistemática poderia levar a outros resultados.*

## CAPITULO X

### SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com o objetivo de complementar os estudos da avaliação da técnica MIG/MAG Duplo Arame com variação do modo operacional e polaridade de corrente no arame-seguidor, aplicada à soldagem mecanizada de passes de enchimento em uma junta de topo, apresentam-se as seguintes sugestões para os trabalhos futuros:

- estudar o efeito da composição do gás de proteção sobre a estabilidade dos vários modos operacionais de corrente atuando em polaridade negativa, no tocante ao comprimento do arco, estabilidade de transferência metálica e formação do cordão de solda;
- caso a combinação de soldagem Pulsado(+) - CCC(-), estudar o desempenho em polaridade negativa com outros modos de controle de transferência metálica por curto-circuito disponíveis no mercado e sua aplicação na soldagem MIG/MAG Duplo Arame;
- avaliar a influência do ângulo de ataque da tocha duplo arame sobre a formação e geometria do cordão de solda para a condição de soldagem de chapa fina em junta sobreposta, visando diminuir a convexidade dos cordões de solda feitos utilizando a polaridade negativa em arame seguidor;
- avaliar o desempenho das combinações Pulsado(+) - Pulsado(-) e Pulsado(+) - CCC(-) na soldagem de revestimentos;
- estudar o uso de outros níveis de corrente em cada arame seja polaridade positiva ou negativa, com intuito de se avaliar a estabilidade do processo;
- fazer filmagens com uma câmera de alta velocidade para se estudar melhor a

- transferência metálica em modo operacional Pulsado(-) e CCC(-) e seu comportamento quando for soldar com dois arames;
- verificar a influência da distância e ângulo entre os eletrodos sobre a interação magnética entre os arcos e formação do cordão de solda (especialmente para as combinações Pulsado(+) - Pulsado(-) e Pulsado(+) - CCC(-));
- avaliar o uso da nova versão do equipamento de soldagem, que tem melhor desempenho para se soldar em CCC, ou usar outro equipamento.

## CAPITULO XI

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS

ANDERSSON, J.; TOLF, E.; HEDEGARD, J. The Fundamental Stability Mechanisms in Tandem - MIG/MAG Welding and How to Perform Implementation. **IIW Document**. n. XII-1895-06, 2006.

AWS, **AWS A3.0M/A3.0**: Standard Welding Terms and Definitions. 2010.

BERGE, J. Using the Tandem Welding Process to Your Advantage. Disponível em <http://www.thefabricator.com/article/automationrobotics/using-the-tandem-welding-process-to-your-advantage>>>. Acesso em: 27 Jan. 2014.

BLACKMAN, S. A.; LIRATZIS, T.; HOWARD, R.; DORLING, D. V. High Speed Multi Wire GMAW for High Strength Transmission Pipelines. AWS WELDING SHOW, 2005, Dallas, USA. **Anais...** p. 125-130.

BLACKMAN, S.; LIRATZIS, T.; HOWARD, R.; HUDSON, M.; DORLING, D. Tandem Pulsed Gas Metal Arc Welding For x100 Pipelines. In: INTERNATIONAL PIPELINE CONFERENCE, 2002, Calgary, Alberta. **Summary report**. p. 67.

BÖHME, D.; NENTWIG, R.; KNOCH, R. A High Efficiency Welding Process-the Double Wire Welding. PROC. CONF. IIW ASIAN WELDING CONGRESS (PRODUCTIVITY BEYOND 2000), 1996, Auckland. **Summary report**. P. 82-87.

CAIMACAN, D. **Avaliação do uso de Curto-Círcuito Controlado em Soldagens de Passes de Enchimento por MIG/MAG Duplo Arame**. 2014. 160 f. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

CHURCH, J. G.; IMAIZUMI, H. T.I.M.E. Process. **IIW Document**. n. XII-1199-90,1990. DERUNTZ, B. D. Assessing the Benefits of Surface Tension Transfer® Welding to Industry. **Journal of Industrial Technology**. v. 19, n. 4, p. 2-8, Aug/Oct. 2003.

DZELNITZKI, D. Increasing the Deposition Volume or the Welding Speed-Advantages of heavy-duty MAG welding. **Welding & Cutting**. v. 51, n. 9, p. 197-201, 1999.

EBRAHIMNIA, M.; GOODARZI, M.; NOURI, M.; SHEIKHI, M. Study of the Effect of Shielding Gas Composition on the Mechanical Weld Properties of Steel ST 37-2 in Gas Metal Arc Welding. **Materials and Design**. n. 30, p. 3891-3895, 2009.

ERA, T.; UEZONO, T.; UEYAMA, T.; HIRATA, Y. Controlled Bridge Transfer Gas Metal Arc Process for Steel Sheets Joining. **Welding International**. n. 4,v. 27, p. 268-273, 2013.

FANG, C.; MENG, X.; HU, Q.; WANG, F.; REN, G.; WONG, H.; GUO, Y.; MAO, M. Tandem and GMAW Twin Wire Welding of Q690 Steel Used in Hydraulic Support. **Journal of Iron and Steel Research**. v. 19,n. 5, p. 79-85, 2012.

FARIA, J. P.; MIRANDA, H. C.; MOTTA, M. F.; QUIEROZ, F. D.; PAIVA, E. F.; PESSOA. Effect of square-wave AC GMAW on weld beam geometry. **Welding International**. v. 21, n. 3, p. 212–219, 2007.

FERREIRA, D. F.; FERRARESI, V. A. The Influence of Gas Shielding Composition and Contact Tip to Work Distance in Short Circuit Metal Transfer of Ferritic Stainless Steel. **Welding International**. v. 4,n. 3, p. 206-2013, Mar. 2010.

GOECKE, S.; HEDEGARD, J.; LUNDIN, M. Tandem MIG/MAG Welding. **Svetsaren**. n. 2-3, p. 24-28, 2001.

GONÇALVES, R. H.; GOHR, R. J.; DUTRA, J. C.; OLIVEIRA, M. A. Soldagem MIG/MAG em curto-circuito controlado (CCC) Aplicada ao passe de raiz. **XXXI CONSOLDA – CONGRESSO NACIONAL DE SOLDAGEM**, 31, 2005, Campinas.

GONZALES, A. M. R.; DUTRA, J. C. Análise e desenvolvimento do processo MIG/MAG duplo arame com potencial único. **XXV ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DA SOLDAGEM**, 25, 1999, Belo Horizonte.

GRATZKE, P. D.; KAPADIA, J.; DOWDEN, J. Theoretical Approach to the Humping Phenomenon in Welding Processes. **Journal of Physics D: Applied Physics.** 25 (11), p. 1640-1647, 1992.

GROETELAARS, P. J.; SCOTTI, A. Influência do Teor de CO<sub>2</sub> no Gás de Proteção sobre a Transferência Metálica no Processo MIG/MAG Duplo-Arame. **Soldagem e Inspeção.** v. 2, n. 1, p. 29 -37, jan/mar. 2007.

HACKL, H. TIME TWIN-High-speed GMA Welding With Two Wire Electrodes. **Welding Journal.** p. 21-25, nov. 1999.

HARRIS, I. D. Arc Welding Automotive Aluminum. **Advanced Materials & Process.** p. 52-54, Sep. 2001

HEDEGÅRD, J.; ANDERSSON, J.; TOLF, E.; WEMAN, K.; LUNDIN, M. Enhanced Prospects for Tandem-MIG/MAG Welding. **IIW Document.** n. XII-1808-04, 2004.

HEDEGARD, J.; TOLF, E.; ANDERSSON, J. High-penetration Tandem-MIG/MAG Welding. **IIW Document.** n. XII-1918-07, 2007.

IMC SOLDAGEM. **Manual de Instruções DIGIPlus A7.** p. 88, 2012.

JUNIOR. J. C. S. , ROCHA, D. B. , BRANDI, S. D. Uma Breve Revisão Histórica do Desenvolvimento da Soldagem dos Aços API para Tubulações. **Soldag. Insp.** São Paulo, v. 18, n. 2, p. 176-195, abr/jun. 2013.

KATAOKA, T.; IKEDA, R.; YASUDA, K. Development of Ultra-low Spatter CO<sub>2</sub> Gas-shielded Arc Welding Process “J-STAR® Welding”. **JFE TECHNICAL REPORT.** n. 10, p. 31-34, Dec. 2007.

KETRON, D. L. Assessment and Development of Twin Wire GMAW. **Progress Report PR0006,** 2006.

KOVALENKO, O. MIG/MAG com APSTT (Alternância de Polaridade Sincronizada com Tecimento Transversal) Visando Automação da Soldagem do Passe de Raiz em Tubulações. 2014. 148 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia.

LANCASTER, J. F. **The Physics of Welding.** 2.ed. New York: Oxford, Pergamom, 1986.

MACHADO, M. V. R. Sistema de Aquisição para Duplo-Arame Conexões Remoto Digtec 600. **Relatório interno do Laprosolda.** 10 p, Fev. 2009.

MELTON, G. B.; MULLIGAN, S. J. Tandem MIG Welding for Improved Productivity. EUROJOIN4-4TH EUROPEAN CONFERENCE ON WELDING, JOINING AND CUTTING. DEVELOPMENT OF WELDING AND ALLIED PROCESSES AT THE BEGINNING OF THE NEW MILLENNIUM, 2001, Cavtat-Dubrovnik, Croatia.

MEYER, M.; LAHNSTEINER, R. GMAW-High Deposition Welding in Automotive Application. PROC. CONF. WTIA 46<sup>TH</sup> ANNUAL CONFERENCE, 1998, Perth, Australia.

MICHIE, K.; BLACKMAN, S.; OGUNBIYI, T. E. Twin-wire GMAW: Process Characteristic and Application. **Welding Journal.** n. 5, p. 31-34, 1999.

MOTTA, M. **Aplicação do Processo MIG/MAG Pulsado com Duplo Arame e Potenciais Isolados em Soldagens de Revestimento.** 2002.168 f. Tese de Doutorado-Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina.

MOTTA, M. F.; DUTRA, J. C. Uma Discussão Sobre a Utilização da Corrente Pulsada no Processo MIG/MAG Duplo Arame com Potencial Isolado. XXVII CONSOLDA – CONGRESSO NACIONAL DE SOLDAGEM, 27, 2001, Campinas.

MOTTA, M. F; DUTRA, J. C.; GOHR, R.; SCOTTI, A. A Study on Out of Phase Current Pulses of the Double Wire MIG/MAG Welding Process with Insulated Potentials On Coatings Applications. **Welding and Cutting.** v. 4, n. 1, p. 26-32, 2005.

NGUYEN, T. C.; WECKMAN, D. C.; JOHNSON, D. A.; KERR, H. W. High Speed Fusion Weld Bead Defects. **Science and Technology of Welding and Joining.** v. 11, n. 6, p. 618-633, 2006.

NORRISH, J. **Advanced Welding Process.** Cambridge: Woodhead Publishing, 2006.288 p.

PALANI, P. K.; MURUGAN, N. Selection of Parameters of Pulsed Current Gas Metal Arc Welding. **Journal of Materials Processing Technology.** n. 172, p. 1-10, 2006.

PEIGANG, L.; PER, N.; MARKOCSAN, N.; KLEMENT, U. Characterization of Cold Lap Defects in Tandem Arc MAG Welding. 63<sup>rd</sup> ANNUAL ASSEMBLY & INTERNATIONAL

CONFERENCE OF THE INTERNATIONAL INSTITUTE OF WELDING, 2010, Istanbul, Turkey.

PESSOA, E. F. **Estudo Exploratório da Soldagem MIG/MAG com Duplo Arame Empregando Corrente Alternada.** 2007. 153 f. Dissertação de Mestrado-Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

PURSLOW, M.; MASSEY, S.; HARRIS, I. Using Tandem Gas Metal Arc Welding to Create Heavy Weldments. **Welding Journal.** p. 34-35, nov. 2009.

REIS, R. P.; NORRISH, J.; CUIURI, D.; NICHOLSON, A. A Flexible Control Program for Research and Development in Tandem GMA Welding. **Welding International.** 2010.

REIS, R. P.; SCOTTI, A.; NORRISH, J.; CURIURI, D. Investigation on Welding Arc Interruptions in the Presence of Magnetic Fields: Welding Current Influence. **IEEE Transactions on Plasma Science.** v. 40, n. 3, p. 870-876, mar. 2012.

RESENDE, A. A.; KEOCHEGUERINAS, F.; VILARINHO, O. V. The Influence of CO<sub>2</sub> and O<sub>2</sub> content on Globular Spray Transition Current When Using Argon-Based Blends in GMAW of ER 70S 6 wire. **Welding International.** v. 24, n. 8, p. 593-601, 2010.

SCOTTI, A.; MORAIS, C. O.; VILARINHO, L. O. The Effect of Out-of-Phase Pulsing on Metal Transfer in Twin-Wire GMA Welding at High Current Level. **Welding Journal.** p. 225-230, oct. 2006.

SCOTTI, A.; PONOMAREV, V. **Soldagem MIG/MAG: melhor entendimento, melhor desempenho.** São Paulo: Artliber Editora, 2008. 284p.

SILVA, M. M.; OLIVEIRA, W. C.; MACIEL, T. M.; SANTOS, M. A.; MOTTA, M. F. Caracterização de Solda de Revestimento de AWS 317L Depositados por GMAW Duplo Arame em Aços ASTM A 516 Gr 60 para Uso na Indústria do Petróleo. **Soldagem e Inspeção.** São Paulo, v. 15, n. 3, p. 225-233, jul/set. 2010.

SKHABOVSKYI, I. **MIG/MAG RSSP (com Reversão Sincronizada do Sentido da Tocha e da Polaridade) Visando Automação de Soldagem do Passe de Raiz em Tubulações.** 2014. 154 f. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

SMATI, Z. Automatic Pulsed MIG Welding. **Metallic Construction**. p. 38-44, jan. 1986.

SOUZA, D.; RESENDE, A. A.; SCOTTI, A. A Qualitative Model to Explain the Polarity Influence on the Fusion Rate in the MIG/MAG Process. **Welding International**. v. 24, n. 12, p. 934-941, 2010.

SOUZA, D.; SCOTTI, A. Influência do Aumento da Distância Bico de Contato Peça na Estabilidade do Processo MIG/MAG Operando em Curto-Círcuito. 19º POSMEC-SIMPÓSIO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO. Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica, 2009, Uberlândia.

STAUFER, H. 'CMT-Twin' – Expanding GMA-Tandem Welding. **IIW Document**. n. XII-2073-12, 2012.

STERJOVSKI, Z.; BAYLEY, C.; DONATO, J.; LANE, N.; LANG, D. Challenges in Single-Bead Pulsed Tandem Gas Metal Arc Welding of Naval Hull Steels. **IIW Document**. n. XII-2075-12, 2012.

STERJOVSKI, Z.; DONATO, J.; Li, H. The effect of Welding Speed and Contact-Tip-to-Workpiece Distance on the Microstructural Homogeneity and Bead Profile of Tandem GMA Steel Welds. **Materials Science & Technology**. Conference & Exhibition, 2010

STERJOVSKI, Z.; DONATO, J.; MUNRO, C.; LANE, N.; LUZIN, V.; LARKIN, N. Application of Pulsed Tandem Gas Metal Arc Welding for Fabrication of High Strength Steel Panels in Naval Surface Vessels. **Australasian Welding Journal**. v. 56, p. 37-48, 2011.

TALKINGTON, B. S. **Variable polarity gas metal arc welding**. 1998.113p. Masters Dissertation-The Ohio State University, Ohio.

TANDEM MIG PROCESS. High speed Tandem MIG Welding. Catálogo do Lincoln Eletric.

TONG, H.; UEYAMA, S.; HARADA, S.; USHIO, M. Quality and Productivity Improvement in Aluminium Alloy Thin Sheet Welding Using Alternating Current Pulsed Metal Inert Gas Welding System. **Science and Technology of Welding & Joining**. v. 6, n. 4, p. 203-208, Aug. 2001.

TROMMER, G. Tandem Wire Process Tandem Wire Process Improves Ship Panel Production. **Welding Journal**. p. 42-45, sept. 2009.

UEYAMA, T.; OHNAWA, T.; TANAKA, M.; KAZUHIRO, N. High Speed Tandem Pulsed GMA Welding of Steel Sheets. **IIW Document**. n. XII-1867-05, 2005.

UEYAMA, T.; OHNAWA, T.; TANAKA, M.; KAZUHIRO, N. Occurrence of Arc Interference and Interruption in Tandem Pulsed GMA Welding. **IIW Document**. n. XII-1883-06, 2006.

UEYAMA, T.; OHNAWA, T.; TANAKA, M.; NAKATA, K. Effects of Torch Configuration and Welding Current on Weld Bead Formation in High speed Tandem Pulsed GMA Welding of Steel Sheets. **IIW Document**. n. XII 212-1081-05, 2005.

UEYAMA, T.; UEZONO, T.; ERA, T.; TANAKA, M.; NAKATA, K. Solution to Problems of Arc Interruption and Arc Length Control in Tandem Pulsed Gas Metal Arc Welding. **Science and Technology of Welding and Joining**. v. 14, n. 4, p. 605-614, 2009.

UEYAMA, T.; UEZONO, T.; HARADA, S. Approach to Cost Down Through Welding Equipments. **Welding Technique**. v. 46, n. 5, p. 68-71, 1999.

YUDODIBOROTO, B. Y. B.; HERMANS, M. J. M.; RICHARDSON, I. M. Process Stability Analysis during Tandem Wire Arc welding. **Soldagem e Inspeção**. São Paulo, v. 12, n. 1, p. 82-91, jan/mar. 2008.

YUDODIBROTO, B. Y. B.; HERMANS, M. J. M.; RICHARDSON, I. M. The Influence of Pulse Synchronisation on the Process Stability during Tandem Wire Arc Welding. **IIW Document**. n. XII-1910-06, 2006.

ZIELINSKA, S.; PELLERIN, S.; DZIERZEGA, K.; MUSIOL, K.; IZARRA, DE CH.; BRIAND, F. Gas Influence on the Arc Shape in MIG-MAG Welding. **The European Physical Journal Applied Physics**. v. 43, n. 1, p. 111-122, Sep. 2008.

## ANEXO I

### Características das fontes de soldagem e do sistema de aquisição de dados

Tabela - Características das fontes MTE Digitec 600 e DigiPlus A7

Parâmetros	MTE Digitec 600	DigiPlus A7
Faixa de Corrente	5 a 600 A	5-450 A
Tensão em Vazio	64 V	68 V
Alimentação	380 V-3 Ø	380 V-3 Ø
Fator de potência	0,95	0,94
Dimensões	500 x 600 x 600 mm	800 x 550 x 610 mm
Peso	150 kg	180 kg

Sistema de aquisição de dados



Figura 3.13– Placa de aquisição da *National Instruments*® modelo NI USB-6009

Tabela 3.5–Especificações da placa de aquisição da *National Instruments*® modelo NI USB-6009

Entradas analógicas	
Canais single-ended	8
Canais diferenciais	4
Resolução	14 bits
Taxa de amostragem	48 kS/s
Throughput (todos os canais)	48 kS/s
Faixa máxima de tensão	-10 V, +10 V
Exatidão na faixa máxima de tensão	138 mV
Faixa mínima de tensão	-1 V, 1 V
Exatidão na faixa mínima de tensão	37,5 mV
Quantidade de faixas	8
Amostragem simultânea	Não
Memória on-board	512 B
Saídas analógicas	
Canais	2
Resolução	12 bits

Tensão máxima	5 V
Faixa máxima de tensão	0 V, 5 V
Exatidão na faixa máxima de tensão	7mV
Faixa mínima de tensão	0 V, 5 V
Taxa de atualização	150 S/s
Drive de corrente, individual	5mA
Drive de corrente,	10 mA

## APÊNDICE I

### Calibração de equipamentos utilizados ao longo do trabalho

Tabela - Calibração do alimentador de arame para fonte MTE Digitec 600 LÍDER

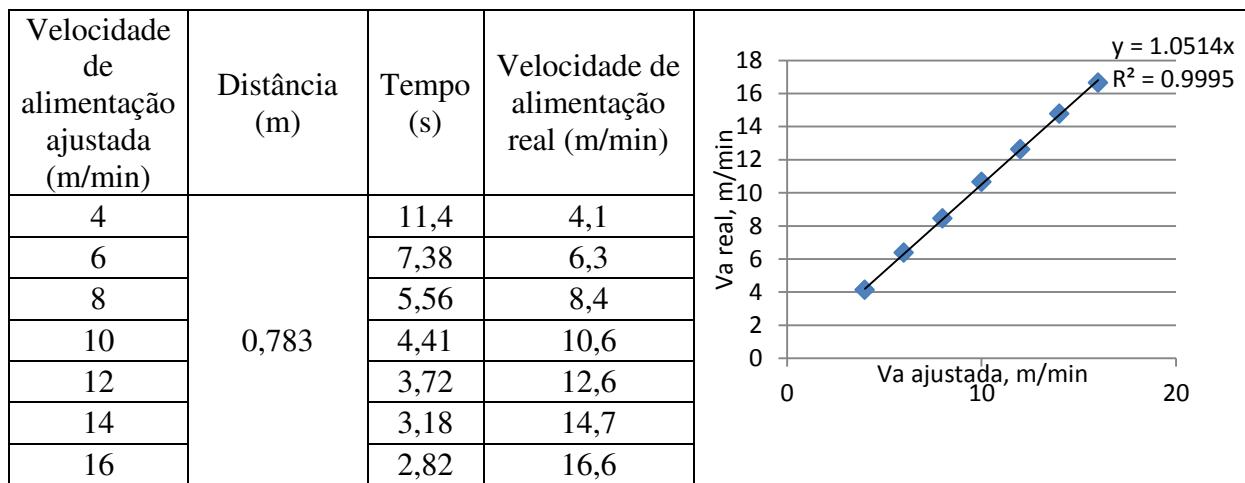


Tabela - Calibração do alimentador de arame para fonte MTE Digitec 600 SEGUIDOR

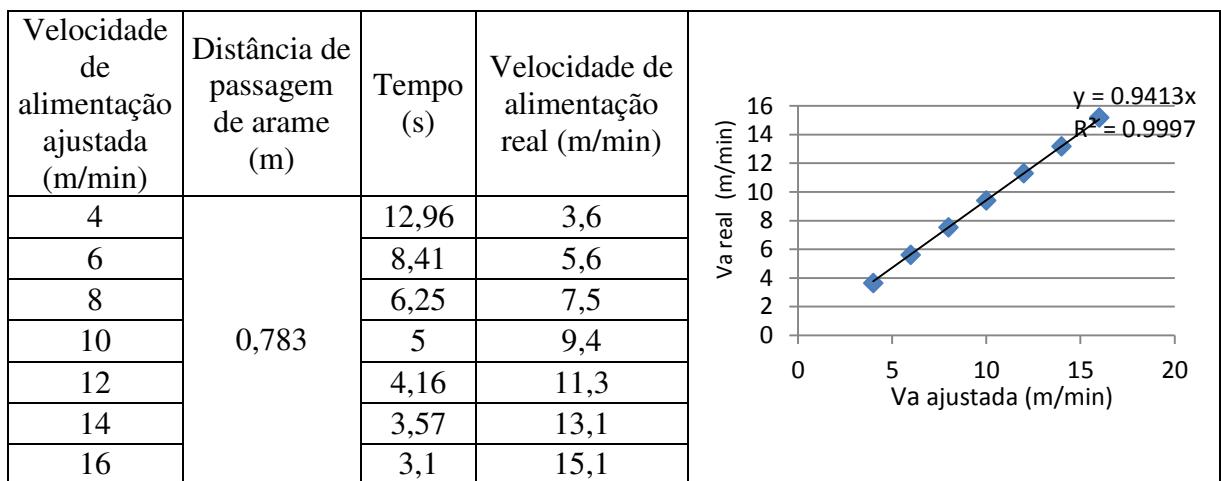


Tabela - Calibração do alimentador de arame para fonte Digiplus A7

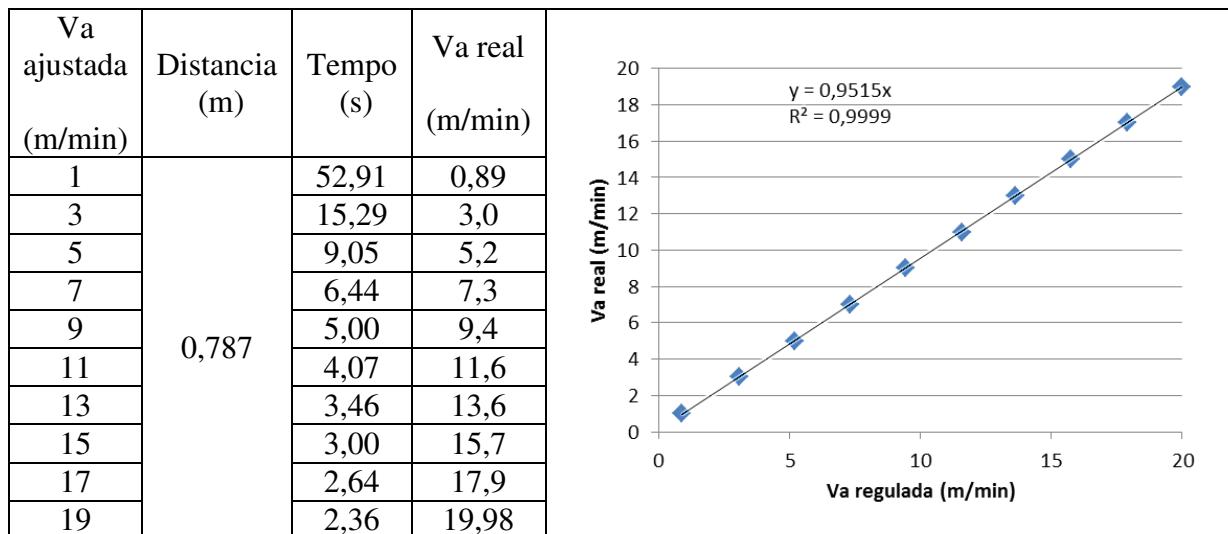


Tabela - Calibração da mesa de coordenadas X-Y

