

**DUMITRU CAIMACAN**

**AVALIAÇÃO DO USO DO CURTO-CIRCUITO  
CONTROLADO (CCC) NA SOLDAGEM DE PASSES  
DE ENCHIMENTO PELO PROCESSO MIG/MAG  
DUPLO ARAME**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DA ENGENHARIA MECÂNICA

**2014**

**DUMITRU CAIMACAN**

**AVALIAÇÃO DO USO DO CURTO-CIRCUITO CONTROLADO (CCC)  
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. PhD. Américo Scotti

**UBERLÂNDIA - MG**

**2014**

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

---

C134a Caimacan, Dumitru, 1988-  
2014        Avaliação do uso do curto-circuito controlado (ccc) na soldagem de  
              passes de enchimento pelo processo mig/mag duplo arame / Dumitru  
              Caimacan. - 2014.  
              130 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. I. Scotti,  
Américo, 1955- II. Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

CDU: 621

---

Aos meus pais, Maria e Vasile.

À minha irmã, Viorica.

À toda minha família.



**“Vai ser difícil, mas não impossível”  
(Américo Scotti)**

## **AGRADECIMENTOS**

Ao meu orientador, Prof. PhD. Américo Scotti, pelo ensino e transferência de conhecimentos e pela extraordinária orientação (muito obrigado, Professor);

À Pós-graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica da UFU, pela oportunidade de ser estudante do seu programa, e à FAPEMIG, pelo apoio financeiro (bolsa de estudo);

Ao grupo LAPROSOLDA, pelo suporte técnico e laboratorial;

A todos os professores e pessoal da área de soldagem da UFU, pelo apoio e ensinamento;

A Andrii Mishchenko, pela camaradagem e auxílio no desenvolvimento do trabalho;

E a todos que contribuíram de alguma forma para o desenvolvimento do meu projeto e para a minha formação profissional, acadêmica e pessoal, e em especial a Diandro, Luiz Carlos, José Francisco, Carolina, Olga, Maksim, Anna, Oksana e Iaroslav, com os quais tive oportunidade de ter mais contato.

CAIMACAN, D. **Avaliação do Uso do Curto-Circuito Controlado (CCC) na Soldagem de Passes de Enchimento pelo Processo MIG/MAG Duplo Arame**. 2014. 117 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

## RESUMO

O processo MIG/MAG Duplo Arame (MIG/MAG DA) tem sido aplicado com o objetivo de aumentar a capacidade produtiva do processo MIG/MAG convencional (único arame). O MIG/MAG DA normalmente utiliza corrente pulsada em ambos os arames e um arco bem curto. Entretanto, a aplicação desta técnica é ainda pouco explorada, sobretudo quanto a potenciais melhorias pela utilização de outros modos de transferências metálicas. Um possível modo de transferência é o Curto-Circuito Controlado (CCC), cuja característica principal é de se poder trabalhar com arco bem curto, o que tem sido uma demanda na regulação do MIG/MAG DA. Além disto, pode-se prever a soldagem automatizada de passes de enchimento como uma aplicação importante para o MIG/MAG DA. Assim, o objetivo desse trabalho foi avaliar o uso do modo operacional CCC em soldagens de passes de enchimento pela técnica MIG/MAG DA. A avaliação foi feita através de um estudo comparativo entre a técnica MIG/MAG DA convencional e uma técnica proposta com combinação de corrente pulsada no arame-líder e CCC no arame-seguidor. Esta comparação foi feita pela soldagem de passes de enchimento (passe único ou múltiplos passes) em chapas de aço ao carbono nas posições plana e sobrecabeça. Foram mantidos constantes os valores das correntes médias em cada arame, o volume de material depositado por unidade de comprimento de solda, o tipo e dimensão do chanfro, a composição química do gás de proteção e a DBCP. Como critério de avaliação, usou-se o acabamento superficial e geometria dos cordões de solda, a taxa e a eficiência de deposição e as velocidades limites de soldagem. Os resultados mostram que o uso do CCC no arco seguidor pouco influi sobre a capacidade de produção e sobre o envelope operacional do processo (quanto à faixa de velocidades de soldagens úteis), mas levou a menores quantidades de respingos, melhor acabamento do cordão e ZF e ZAC de menores volumes. Por outro lado, na posição sobrecabeça o CCC não manteve a mesma eficiência, apresentando um envelope operacional mais restrito. De uma forma geral, concluiu-se que o uso do CCC no arame seguidor apresenta vantagens em comparação à técnica convencional, em que no arame seguidor é usada corrente pulsada, na soldagem de passes de enchimento, principalmente na posição plana.

**Palavras-chave:** MIG/MAG Duplo Arame; transferência controlada; passe de enchimento.

CAIMACAN, D. Assessment of the use of Controlled Short-Circuiting in Filling Passes Welding with Double Wire MIG/MAG Process. 2014 117 p. Thesis, Federal University of Uberlandia, MG, Brasil.

### ABSTRACT

The Double Wire MIG/MAG welding process (DW MIG/MAG) was developed to increase the production capacity of the conventional MIG/MAG welding process (single wire). The MIG/MAG DW generally uses pulsed current in both wires and a very short arc. However, the application of this technique is still not fully explored, particularly in relation to the potential improvements from the use of other metal transfer modes. One of the possible transfer modes is the Controlled Short-Circuit, which presents as main characteristic working with short arc, what has been a demand of DW MIG/MAG parameter settings. Furthermore, filling passes in automated welding would be an important application for the DW MIG/MAG. Thus, the objective of this work was to evaluate the use of the Controlled Short-Circuiting (CSC) operational mode infilling pass welding with the DW MIG/MAG process. The assessment was carried out through a comparative study between the conventional version of the process and a proposal applying pulsed current in the leader wire and CSC in the trailing wire (P-CSC). This comparison was established in welding of filling passes (single or multiple passes) on carbon steel plates in the flat and overhead positions. For comparative purposes, the average current at each wire, the volume of deposited metal per weld unit length, the type and size of the joint groove, the shielding gas chemical composition and the CTWD were kept constant. As assessment criteria, the surface finish and the geometry of the weld beads, the deposition rate and efficiency and the travel speed limits were used. The results show that the use of CSC in the trailing wire has low influence on the production capacity and on the operational maps of the DW MIG/MAG process, yet presents less spatter generation, better visual aspect of the welds and smaller volume of HAZ and molten zone. On the other hand, in the overhead position CSC did not maintain the same performance, presenting a more restrict operational map. In general, it was concluded that the use of CSC in the trailing wire presents advantages in comparison to the conventional DW MIG/MAG, in which pulsed current is used in both wires, for filling pass welding, mainly in the flat position.

**Key-words:** Double WireMIG/MAG; controlled metal transfer; filling pass.

## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

A	Área transversal do arame eletrodo
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas;
CA	Corrente Alternada;
CBT	<i>Controlled Bridge Transfer</i> ;
CCC	<i>Curto-Circuito Controlado</i> ;
CMT	<i>Cold Metal Transfer</i> ;
DA	Duplo Arame;
DBCP	Distância bico de contato-peça;
ER	Eletrodo Revestido;
GMAW	<i>Gas Metal ArcWelding</i> ;
I <sub>b</sub>	Corrente de base;
IIW	<i>International Institute of Welding</i> ;
I <sub>L</sub>	Corrente média arame líder;
I <sub>m</sub>	Corrente média;
I <sub>p</sub>	Corrente de pulso;
I <sub>rms</sub>	Corrente eficaz;
I <sub>T</sub>	Corrente media arame seguidor;
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	Pulsado;
ρ	Densidade do aço;

Q	Quantidade de metal depositado por comprimento do cordão de solda;
RPM	Rotações por minuto;
STT	Surface Tension Transfer;
T <sub>b</sub>	Tempo de base;
T <sub>p</sub>	Tempo de pulso;
U <sub>m</sub>	Tensão média;
U <sub>rms</sub>	Tensão eficaz;
USB	<i>Universal Serial Bus</i> ;
V <sub>a</sub>	Velocidade de alimentação do arame;
V <sub>atotal</sub>	Velocidade de alimentação total dos dois arames;
V <sub>s</sub>	Velocidade de soldagem;
ZAC	Zona Afetada pelo Calor.

## Sumário

<b>RESUMO</b> .....	VI
<b>ABSTRACT</b> .....	VII
<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS</b> .....	VIII
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	X
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	XI
<b>CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO</b> .....	1
<b>CAPÍTULO II - REVISÃO BIBLIOGRAFICA</b> .....	3
2.1 - Vantagens do processo MIG/MAG com Duplo Arame (DA).....	4
2.1.1 - <i>Velocidades de soldagem alcançáveis com MIG/MAG DA</i> .....	5
2.1.2 - <i>Taxas de deposição alcançáveis com MIG/MAG DA</i> .....	5
2.1.3 - <i>Redução dos números de passes alcançáveis com MIG/MAG DA</i> .....	6
2.1.4 - <i>Economicidade do processo MIG/MAG DA</i> .....	6
2.2 - Classificação do Processo MIG/MAG com Duplo Arame .....	6
2.3 - Disposição dos eletrodos no processo MIG/MAG DA .....	8
2.3.1 – <i>Arame Líder e Seguidor no processo MIG/MAG DA</i> .....	8
2.4 - Ângulo de ataque dos eletrodos no processo MIG/MAG DA .....	9
2.5 – Distância entre os eletrodos no processo MIG/MAG DA .....	9
2.6 - Corrente de soldagem no processo MIG/MAG DA .....	12
2.6.1 - <i>Tipos de transferências usados no processo MIG/MAG DA</i> .....	12
2.6.2 - <i>Penetração no processo MIG/MAG DA</i> .....	13
2.6.3 - <i>Parametrização no processo MIG/MAG DA</i> .....	13
2.7 - Sincronização das máquinas de soldagem e a defasagem no processo MIG/MAG DA .....	13
2.8 - Gás de Proteção no processo MIG/MAG DA .....	15
2.9 - Tipos de descontinuidades no processo MIG/MAG DA .....	16
2.10 - Soldagem fora de posição no processo MIG/MAG DA .....	18
2.11 - Tipos de DA, modificações para aumento da produtividade do processo MIG/MAG DA .....	18

2.12 - Tipos de Curto-Circuito Controlado .....	19
2.13 - Modos de uso do Curto-Circuito em combinação com outros processos.....	25
<b>CAPÍTULO III - EQUIPAMENTOS, INSUMOS E METODOLOGIA .....</b>	<b>27</b>
3.1 - Bancada de soldagem .....	27
3.1.1 - Fontes de soldagem .....	27
3.1.2 - Tochas de soldagem .....	29
3.1.3 - Mesa de coordenadas ortogonais X-Y.....	30
3.1.4 - Fixação das chapas .....	31
3.1.5 - Sistema de aquisição e monitoramento da corrente e tensão .....	31
3.1.6 - Sistema de refrigeração da tocha de soldagem .....	33
3.1.7 - Equipamentos para confeccionar as placas de testes .....	33
3.1.8 - Balança usada para pesagem de chapas .....	34
3.1.9 - Preparação das amostras e análise metalográfica.....	34
3.2 - Insumos .....	35
3.2.1 - Materiais de base .....	35
3.2.2 - Material de adição .....	35
3.2.3 - Gás de proteção .....	35
3.3 - Metodologia .....	36
<b>CAPÍTULO IV - SOLDAGEM DE PASSES DE ENCHIMENTO EM JUNTA DE TOPO NA</b>	
<b>    POSIÇÃO PLANA.....</b>	<b>39</b>
4.1 - Preparação experimental para soldagem de passe de enchimento na posição plana (passe único e multipasses) .....	39
4.1.1 - Preparação das placas de testes.....	39
4.2 - Avaliação comparativa em MIG/MAG DA P-P e MIG/MAG DA P-CCC em soldagem de passe único na posição plana .....	44
4.2.1 - Soldagem com o processo MIG/MAG DA P-P .....	44
4.2.2 - Soldagem com processo MIG/MAG DA P-CCC .....	48
4.2.3 - Discussão e comparação dos resultados na soldagem de um passe de enchimento.....	51
4.3 - Avaliação comparativa em MIG/MAG DA P-P e MIG/MAG DA P-CCC em soldagem multipasses na posição plana .....	56
4.3.1 - Soldagem com processo MIG/MAG DA P-P .....	57
4.3.2 - Soldagem multipasses na posição plana com processo MIG/MAG DA P-CCC .....	59
4.3.3 - Discussão e comparação dos resultados na soldagem multipasses.....	60



## **CAPÍTULO V - SOLDAGEM DE CHAPAS FINAS EM JUNTA SOBREPOSTA NA**

<b>POSIÇÃO PLANA</b> .....	64
5.1 - Preparação das placas de teste e posicionamento da tocha .....	64
5.2 - Soldagem de chapas finas em junta sobreposta na posição plana com processo MIG/MAG DA P-P .....	64
5.3 - Soldagem de chapas finas na posição plana com processo de soldagem MIG/MAG DA P-CCC.....	66
5.4 - Discussão e comparação dos resultados na soldagem de chapas finas em junta sobreposta na posição plana .....	68
5.4.1 - <i>Aspecto visual dos cordões de solda</i> .....	68
5.4.2 - <i>Envelope operacional</i> .....	68
5.4.3 - <i>Análise das seções transversais dos cordões de soldas</i> .....	69
5.4.4 - <i>Avaliação econômica</i> .....	69

## **CAPÍTULO VI - SOLDAGEM DE UM PASSE DE ENCHIMENTO NA POSIÇÃO**

<b>SOBRECABEÇA</b> .....	71
6.1 - Preparação e fixação das chapas de testes .....	71
6.2 - Soldagem de um passe de enchimento na posição sobrecabeça com processo MIG/MAG DA P-P .....	72
6.3 - Soldagem de um passe de enchimento na posição sobrecabeça com processo MIG/MAG DA P-CCC .....	74
6.4 - Discussão e análise dos resultados das soldagens de um passe de enchimento na posição sobrecabeça .....	76
6.5 - Soldagem de um passe de enchimento na posição sobrecabeça com processo MIG/MAG DA P-CCC com uso de rampa .....	79
6.6 - Soldagem de um passe de enchimento na posição sobrecabeça com processo MIG/MAG DA P-P com uso da rampa .....	81
6.7 - Discussão e análise dos resultados na soldagem de um passe de enchimento na posição sobrecabeça com uso da rampa .....	83
6.8 - Influência do comprimento do arco do segundo arame na estabilidade e formação do cordão de solda na soldagem sobrecabeça com processo MIG/MAG DA P-P .....	88
6.9 - Influência da espessura da chapa e da profundidade do chanfro sobre a formação do cordão de solda na soldagem sobrecabeça com MIG/MAG DA P-CCC .....	90

## **CAPÍTULO VII - CONCLUSÕES**..... 94

<b>CAPÍTULO VIII - PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>95</b>
<b>CAPÍTULO IX - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>98</b>
<b>APÊNDICE I - Calibração da Velocidade de Alimentação dos Cabeçotes das Fontes de Soldagem .....</b>	<b>103</b>
<b>APÊNDICE II - Calibração da Velocidade de Movimento da Mesa de Coordenadas Ortogonais no Eixo X .....</b>	<b>105</b>
<b>APÊNDICE III - Calibração do Sistema de Aquisição de Dados e Obtenção de Coeficientes para o Programa LABVIEW .....</b>	<b>106</b>
<b>APÊNDICE IV - Cálculo das Velocidades de Soldagem para Soldagem de Passes de Enchimento .....</b>	<b>110</b>
<b>APÊNDICE V - Cálculo do Material Depositado na Soldagem de Passes de Enchimento .....</b>	<b>111</b>
<b>APÊNDICE VI - Valores do Cálculo da Geometria dos Cordões de Solda Passe de Enchimento .....</b>	<b>114</b>
<b>APÊNDICE VII - Cálculo da Porcentagem de Respingos Na Soldagem De Passes De Enchimento .....</b>	<b>116</b>

# CAPÍTULO I

## INTRODUÇÃO

O processo de soldagem MIG/MAG é um dos mais utilizados na indústria. Novos desenvolvimentos visando alta produtividade e melhor qualidade conduziram para o desenvolvimento de diversas variantes desse processo. O processo MIG/MAG Duplo Arame foi desenvolvido para áreas de aplicação onde altas taxas de deposição são necessárias (comparáveis com as do processo de Arco Submerso), mas em que a flexibilidade do processo MIG/MAG é desejada. A versão mais comum do processo de soldagem com Duplo Arame é realizado com a utilização de duas fontes de energia e dois arames alimentados separadamente, através uma única tocha. Neste caso, a disposição dos eletrodos na tocha é realizada de maneira a se permitir arcos trabalhando no modo sequencial ("Tandem"). O processo Duplo Arame, na forma usual, utiliza-se de corrente contínua ou corrente pulsada em ambos os arames, na polaridade positiva. Em ambos os casos se procura trabalhar com arcos os mais curtos possíveis, para evitar o efeito do sopro magnético e garantir maior estabilidade da poça (menos oscilação da poça devido à menor força do jato de plasma de arcos curtos). Mas um arco muito curto, chegando ao curto-circuito, vai provocar respingos, o que é indesejado.

Considerando-se a constante necessidade de inovação, mesmo para esta versão do processo MIG/MAG ainda tão recente, a empresa Fronius recentemente apresentou uma combinação de arco pulsado no arame-líder, aliado ao processo CMT no arame seguidor. Este processo foi denominado pelo fabricante de CMT Twin (apesar da denominação Twin ser empregada de forma geral para a disposição dos arames paralelos e sob uma única fonte). O CMT é uma das formas de se operar o processo MIG/MAG com curto-circuito controlado, em que a corrente de soldagem é ciclicamente abaixada para valores muito baixos em períodos de tempo predeterminados (em função da corrente de soldagem), de tal forma a forçar a gota em formação na ponta do arame a tocar a poça, permitindo uma transferência da mesma para a poça por tensão superficial. Logo em seguida, em fase com a transferência da gota em curso, a corrente é elevada um pouco para prevenir solidificação da poça e, em seguida, rebaixada novamente. Ao fim de um tempo para se concluir a transferência, o arame-eletrodo tem sua alimentação revertida, forçando o rompimento do menisco remanescente entre arame-poça auxiliando o destacamento por tensão superficial.

Neste momento, o valor da corrente é restabelecido ao valor original, permitindo a reabertura do arco. Esta forma operacional garante uma transferência bem estável, com um nível baixíssimo de respingos e grande homogeneidade térmica. Este fabricante reivindica que as vantagens do modo operacional corrente pulsada (menos respingos, melhor penetração) são aliadas com as do CMT, aumentando a produtividade, a profundidade de penetração e diminuindo o valor de calor aportado. Assim, a Fronius diz proporcionar as melhores propriedades de ambos os modos operacionais em um processo novo.

Existem outras formas de controlar a transferência metálica além do CMT. Basicamente o que se faz é abaixar a corrente no momento em que se perceber um curto-circuito (redução da tensão), facilitando a transferência por tensão superficial. Mas de forma diferenciada do CMT, o destacamento final da gota é feito pela elevação da corrente ainda durante o processo de transferência por tensão superficial, a qual no final exerce o fenômeno de efeito pinch para concluir o destacamento. Ao romper a gota, a corrente é novamente abaixada para evitar um curto de energia ao final de destacamento e, em seguida, aumentado para restabelecer o arco. Esta abordagem também proporciona transferências de alta regularidade e com baixo nível de respingos e é aplicada comercialmente pela Lincoln (STT®), Miller (RMD®), EWM (ColdArc®), Kemppi (Arc Force), IMC (CCC), CBT, e outras.

Considerando as características do modo operacional curto-circuito controlado, é de se visualizar que este modo seria muito adequado para soldagem MIG/MAG com Duplo Arame, por permitir transferência por curto-circuito, consequentemente arco curto (baixa pressão do jato de plasma), e sem respingos. Por outro lado, a transferência por curto-circuito controlado não é adequada para valores altos da corrente, o que contrasta com o MIG/MAG Duplo Arame, que tem mostrado ser aplicado com correntes altas, mais do que 300 A em cada um dos arames. Mas existem ainda algumas aplicações para processo de soldagem MIG/MAG Duplo Arame que não foram ainda exploradas em toda sua plenitude, tais como os passos de acabamento em soldagem na orbital. Neste caso, correntes altas não seriam requisitos.

Dessa forma, o objetivo geral desse trabalho é avaliar o uso do modo operacional curto-circuito controlado em soldagens de passes de enchimento pela técnica MIG/MAG Duplo Arame. Como objetivos específicos, têm-se a avaliação comparativa dos modos operacionais pulsado-pulsado e pulsado-curto-circuito controlado aplicados no processo MIG/MAG duplo arame, quanto à geometria dos cordões de solda (ZAC, área total do cordão, área fundida, penetração, largura, reforço), mapa operacional dos processos e eficiência de deposição dos processos.

## **CAPÍTULO II**

### **REVISÃO BIBLIOGRAFICA**

De acordo com, Yapp e Blackman (2004), a viabilidade econômica de projetos futuros de soldagem de tubulações, por exemplo, depende da habilidade de execução dos passes de enchimento. A velocidade de execução de um passe de enchimento é um fator que define a quantidade de estações de soldagem para se manter o passo com a soldagem de passe de raiz. Neste aspecto, há que se considerar que, com as ampliações das áreas de extração de petróleo e gás pelo mundo, com uma maior agitação do mercado financeiro, nos últimos anos, haverá uma demanda crescente de processos de soldagem com alta versatilidade e grau de automação para a construção de gasodutos e oleodutos, construções navais, indústria automobilística, etc.

Neste contexto, conforme defende Motta e Dutra (2001), a soldagem MIG/MAG com dois arames pode ser utilizada, principalmente com o objetivo de se aumentar a produtividade por intermédio de uma maior taxa de material depositado, uma vez que são empregados dois eletrodos simultaneamente. Essa característica permite imprimir ao processo velocidades de soldagem também superiores. No ponto de vista de Sterjovski et al. (2012), o processo Duplo Arame Pulsado tem, além do potencial de aumentar a produtividade, o de diminuir distorções na fabricação dos painéis para os navios.

De acordo com Yudodibroto et al. (2006), o processo MIG/MAG convencional ainda é de grande uso na prática, pois possui grande versatilidade e facilidade de automação. Mas demandas da indústria estimulam o desenvolvimento dos processos de soldagem com elevada velocidade e taxas de deposição. De outro lado, Groetelaars et al. (2009) afirmam que, como o mercado industrial atual é muito competitivo, o processo MIG/MAG convencional começou a não mais atender a demanda das indústrias, no que diz respeito à produtividade. Os mesmos autores citam que a idéia de se criar o processo MIG/MAG Duplo Arame surgiu na tentativa de se aliar, num único processo, a versatilidade e praticidade do MIG/MAG convencional com elevadas taxas de deposição típicas para arco submerso.

## 2.1 Vantagens do processo MIG/MAG com Duplo Arame (DA)

As vantagens principais aclamadas por Melton e Muligan (2001) do processo DA são os aumentos da taxa de deposição e da velocidade de soldagem. E, além disso, uma maior penetração, a qual pode ser benéfica para a soldagem mecanizada. Na soldagem de soldas de filete, por exemplo, para se obter uma solda com perna de 6 mm, o uso do DA apresentou um aumento da velocidade de soldagem 3,7 vezes maior e uma taxa de deposição 3,5 vezes maior do que no caso da soldagem com um arame. A Fig. 2.1 apresenta outros dados para diferentes pernas de filete quanto ao aumento da velocidade de soldagem.

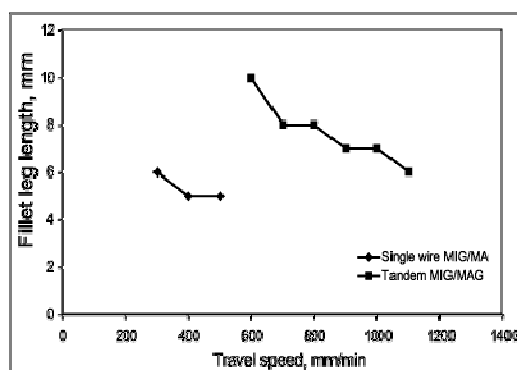


Figura 2.1 – Efeito do aumento da velocidade de soldagem em soldagem de soldas de filete para o processo MIG/MAG com um e dois arames, (MELTON; MULIGAN, 2001)

Dados não muitos diferentes são mencionados por outros autores. Yudodibroto et al. (2006), por exemplo, trabalhando com dois arames eletrodos em tandem, mostraram que poder se aumentar a taxa de deposição e a velocidade de soldagem. Em alguns casos, estes valores podem aumentar mais de duas vezes em comparação com o processo no qual se utiliza apenas um arame.

Motta e Dutra (2001) apresentam uma aplicação da soldagem de uma tampa de um vaso de pressão fabricado por chapas finas, em juntas com abertura estreita em um passe único. Utilizando-se a soldagem MIG/MAG DA, houve um aumento de produtividade de 3 a 4 vezes, comparado com MIG/MAG convencional.

Mas também há benefícios do uso do DA sobre penetração. Goecke et al. (2004) observaram um significativo aumento da penetração quando comparado o MIG/MAG DA com MIG/MAG convencional. Hedegard et al. (2007) afirmam que com MIG/MAG DA foi possível obter-se uma penetração total em junta de T sem preparação do chanfro, o que seria impossível obter utilizando-se um único arame.

### *2.1.1 Velocidades de soldagem alcançáveis com MIG/MAG DA*

De acordo com Nadzam (2002), a velocidade de soldagem alcançada do processo MIG/MAG com duplo arame normalmente é de 1,5 a 1,9 vezes maior do que no caso da soldagem com um único arco. É muito comum encontrar trabalhos com velocidades de soldagem acima de 2,5 m/min. Goecke et al. (2001) afirmam que, com a duplicação dos arames, pode-se obter o dobro da velocidade de soldagem do MIG/MAG convencional.

Na soldagem de chapas finas em junta sobreposta de filete, usando-se uma abertura de raiz de 1,6 mm, OHNAWA et al. (2003) alcançaram uma velocidade de soldagem de 4 m/min, resultando-se soldas regulares sem o aparecimento de descontinuidade. Hedegard et al. (2004), por sua vez, destacam que com MIG/MAG DA alcançou velocidades de 0,8 a 4 m/min, o que corresponde a um aumento de 50 a 300% em comparação com o um arame. Por fim, Motta e Dutra (2001) ressaltam que na soldagem de vasos de pressão foi alcançada uma alta velocidade de soldagem de 3 m/min, aliada com uma alta taxa de deposição (10,65 kg/h).

### *2.1.2 Taxas de deposição alcançáveis com MIG/MAG DA*

Segundo Melton e Muligan (2001), uma taxa de deposição de 17 kg/h pode ser alcançada na soldagem com duplo arame em junta de topo e, também, em soldas de filete com espessura da chapa de 10 mm. Os autores afirmam, igualmente, que este resultado é três vezes maior que aquele que pode ser alcançado na soldagem com um arame. Em outro caso, na soldagem das chapas com espessura maior, onde se precisam efetuar vários passes de enchimento, Nadzam (2002) afirmou que a taxa de deposição para o Tandem GMAW pode variar de 9 a 21 kg/h. Já Sterjovski et al. (2012) afirmam que, com o uso da corrente de 400 A, pode-se alcançar uma taxa de deposição de aproximadamente 15 kg/h.

Para fazer a comparação entre as taxas de deposição do processo MIG/MAG DA e o arco submerso, Lezzi e Costa (2013) apresentam valores de taxas de deposição possíveis de se alcançar em soldagem com o arco submerso:

- 8 kg/h para soldagem com arame tubular;
- 12 kg/h para soldagem Twin Arc;
- 20 kg/h para tandem CA-CC;
- 25 kg/h para soldagem com uma tocha e mais um arame frio;
- 40 kg/h para soldagem com 3 tochas, uma fonte CC e duas CA;
- 50 kg/h soldagem tandem e mais um arame-frio;
- 100 kg/h para soldagem com 6 arcos, 1 CC e 5 CA.

Como se pode observar o processo MIG/MAG DA pode ser um bom concorrente para o arco submerso na soldagem com dois arames.

### *2.1.3 Redução dos números de passes alcançáveis com MIG/MAG DA*

Melton e Mulligan (2001) apresentam os resultados da comparação feita entre a soldagem com o processo MIG/MAG convencional e MIG/MAG DA, na soldagem de chapas com 10 mm de espessura, com a utilização de uma mesma velocidade de soldagem (600 mm/min). Para se encher a junta, os números de passes diminuem de 5 para 2 quando usa DA. Em outra aplicação, Egerland et al. (2009) apresentam o resultado da soldagem de ligas de Al usadas para construção de NLG (aplicações criogênicas), com o processo Eletrodo Revestido (ER) inicial aplicado e MIG DA. Neste caso, para a soldagem de chapas com espessura de 150 mm, elaborou-se um procedimento de 96 passes para se usar ER. No caso do uso do MIG DA, conseguiu-se soldar com apenas 6 passes.

### *2.1.4 Economicidade do processo MIG/MAG DA*

Ueyama et al. (2005) destacam que o processo MIG/MAG possui uma boa flexibilidade e uma boa relação custo-eficiência, o que torna este processo mais vantajoso, se comparado com os demais processos de soldagem. Melton e Mulligan (2001) afirmam que o custo total por metro de solda feita em junta de topo, em chapas de 10 mm espessura, diminuiu em 45%. Lembrando-se que, neste caso, os autores conseguiram reduzir os números de passes de 5 (com um arame) para 2 (executados com DA). Da mesma forma, em soldas de filete usando-se uma chapa de 10 mm espessura, o custo total de solda por metro diminuiu em 26% em comparação com a soldagem MIG/MAG com um arame. Este resultado deve-se ao aumento da velocidade de soldagem no caso do uso do DA.

## **2.2 Classificação do Processo MIG/MAG com Duplo Arame**

Do ponto de vista da energização dos arames-eletrodos, de acordo com Gonzáles e Dutra (1999), Goecke et al. (2001) e Groetelaars et al. (2009), o processo de soldagem MIG/MAG DA pode ser classificado da seguinte forma:

- a) Potencial Único – onde os eletrodos estão em contato elétrico no bico de contato, usando uma mesma fonte de energia. A denominação mais frequente encontrada na literatura deste processo é "Twin MIG" ou "Twin-Wire".



- b) Potencial Isolado – nesta configuração o processo de soldagem é composto basicamente por duas fontes de potência independentes e dois alimentadores de arame. Os parâmetros de soldagem, neste caso, são ajustados independentes para cada arame. O processo pode ser considerado como uma evolução do processo com potencial único e pode ser chamado de "Tandem MIG".

Segundo Scotti et al. (2006), a versão mais popular do MIG/MAG DA é a com potencial isolado, onde os dois arames são fundidos em uma mesma poça de fusão. Motta e Dutra (2001) afirmam que o processo MIG/MAG Duplo Arame com Potencial Isolado tem sido utilizado em aplicações que requerem alta taxa de fusão de material, permitindo-se o emprego de velocidades de soldagem superiores.

Na soldagem com o potencial único, devido ao fato de que ambos os eletrodos estão submetidos ao mesmo potencial, Gonzáles e Dutra (1999) identificaram que o efeito do sopro magnético não pode ser evitado, nem minimizado. Da mesma maneira, Groetelaars et al. (2009), em soldagem com DA potencial único, usando uma DBCP de 16 mm e arames espaçados em apenas 6 mm, observaram uma forte interação magnética entre os arcos, tanto no arame líder, quanto no arame seguidor. Durante os experimentos, os arcos entraram em curto-circuito, o que favoreceu a geração de uma grande quantidade de respingos. Com uma DBCP de 20 mm não se obtiveram resultados aceitáveis e, durante a soldagem, observou-se uma transferência metálica mista (goticular-curto-circuito). Outra observação feita pelos autores foi a atração entre as gotas. Os resultados obtidos por Groetelaars et al. (2009) estão em boa concordância com aqueles obtidos por Gonzáles e Dutra (1999).

Deste modo, Groetelaars et al. (2009) concluem que na soldagem MIG/MAG DA com potencial único realmente existe uma interação magnética entre os arcos. Com o aumento do tamanho do arco, a interação magnética entre os eletrodos aumenta. Os mesmos autores observaram que, com o aumento do tamanho do arco, mantendo-se a mesma faixa de corrente e a mesma velocidade de alimentação, modifica-se o tipo de transferência metálica, de curto-circuito para goticular/globular. Outra característica que um arco maior traz para a soldagem DA com um gás de proteção com baixa porcentagem de  $\text{CO}_2$  é a possibilidade de se obter a transferência metálica goticular, que mesmo apresentando atração entre as gotas, consegue obter cordões com perfis adequados.

No estudo sobre as transferências metálicas possíveis de serem obtidas na soldagem com potencial único, Gonzáles e Dutra (1999) afirmam que, durante a soldagem com a transferência metálica por curto-circuito, o processo duplo arame com potencial único

apresenta uma taxa de fusão específica (kg/h) levemente inferior, em relação ao processo convencional com um arame. Nas transferências por fluxo goticular e pulsada, estas taxas apresentam valores similares, quando comparadas ao processo com um arame. O processo duplo arame pode atingir maiores taxas de fusão absolutas que o processo convencional, aumentando a velocidade de soldagem, sem perda de qualidade do cordão.

Durante a soldagem com o processo duplo arame potencial único, há um risco de se provocar a fusão do arame no bico de contato. Na ocorrência de qualquer problema no fornecimento de um dos arames, o valor da corrente total é obrigado a passar pelo outro eletrodo, que desta forma, deve receber o dobro da corrente necessária para a taxa de fusão estabelecida.

### **2.3 Disposição dos eletrodos no processo MIG/MAG DA**

Na soldagem com Duplo Arame, de acordo com Gonzáles e Dutra (1999) e Groetelaars et al. (2009), existem duas possibilidades de disposição dos eletrodos:

- Em paralelo (posição transversal) – abordagem mais utilizada na soldagem de revestimento;
- Em série (sequencial/posição longitudinal ou tandem) – os eletrodos são colocados um atrás do outro ao longo do cordão de solda. Esta disposição é utilizada na soldagem e união de peças com objetivo de aumentar a velocidade de soldagem. Nesta configuração o primeiro arame é chamado de arame líder e o segundo de arame seguidor.

#### **2.3.1 Arame Líder e Seguidor no processo MIG/MAG DA**

Em uma propaganda, apresentada pela empresa Lincoln Electric (2005), afirma-se que a grande parte da penetração deve-se ao arco do arame líder. Para se assegurar uma estabilidade melhor durante a soldagem com DA, o primeiro arco precisa apresentar uma maior parte da taxa de deposição total. Numa situação em que se utiliza o mesmo diâmetro de eletrodo nos dois arames, o arame de trás precisa representar aproximadamente 60% da velocidade de alimentação total. Suportando essa informação, Nadzam (2002) afirma que em todos os casos o primeiro arco determina o nível da penetração de uma solda e o arco seguidor é responsável pelo acabamento e o reforço dos cordões de soldas.

## **2.4 Ângulo de ataque dos eletrodos no processo MIG/MAG DA**

Em uma aplicação prática, Ohnawa et al. (2003) investigaram a influência do ângulo de ataque do arame seguidor na soldagem de chapas finas, regulando uma distância entre os eletrodos de 12 mm. Usaram um valor da corrente média de 400 A no arame líder e de 160 A no arame seguidor. Os resultados das medições dos cordões de soldas não apresentaram nenhuma alteração da penetração no caso da mudança do ângulo de ataque do arame seguidor. Desta forma, os autores consideraram que o tamanho da penetração é determinado, em grande parte, pelo arame líder.

Ainda sobre os estudos da influência dos ângulos de ataques dos eletrodos, Ueyama et al. (2005) observaram que, com aumento do ângulo do arame seguidor no sentido empurrando, diminui-se o reforço do cordão de solda e aumenta-se a largura. Outra observação feita por estes autores na soldagem com DA foi de que o uso de qualquer ângulo de inclinação dos arames aumenta o valor da velocidade de soldagem, aproximadamente em 65%, se comparado com MIG/MAG convencional com um arame.

Yudodiboroto et al. (2006) também avaliaram a estabilidade do processo. Um processo estável sem interrupções nos arcos foi observado quando o arame-líder foi inclinado em 0°. Quando o ângulo foi 20°, aumentou-se a tendência de curtos-circuitos quando se utilizou o modo tensão constante no arame líder e corrente constante no arame seguidor em fase e corrente constante-corrente constante fora de fase.

## **2.5 Distância entre os eletrodos no processo MIG/MAG DA**

Anderson et al. (2006) avaliaram a influência da distância entre os eletrodos sobre a estabilidade do processo MIG/MAG DA na soldagem de aço de baixa liga, sem uso da defasagem. Eles efetuaram soldas com vários tipos de transferências metálicas em ambos os arames (curto-circuito, goticular e pulsada). Mantendo-se uma DBCP de 20 mm, usaram ângulos de ataque diferentes para os arames (Fig. 2.2). Regulando-se a distância para 20 mm (configuração A), não foi observada nenhuma atração entre os arcos e foi possível utilizar livremente todos os tipos de transferência metálica. Já durante a soldagem com distância entre os eletrodos de 10 mm (configuração B), os autores observaram uma estabilidade satisfatória em todos os casos, mas durante a soldagem, quando se usou a corrente pulsada em ambos os arames, as soldas apresentaram menores quantidades de respingos gerados. Diminuindo-se a distância em até 5 mm (configuração C) durante a soldagem com curto-circuito, o processo perdeu a estabilidade e gerou uma quantidade alta

de respingos. Durante a soldagem com a inter-distância de 5 mm, os autores observaram a junção completa do arco. Aumentando-se a distância entre os arames, a interação magnética entre os eletrodos diminuiu.

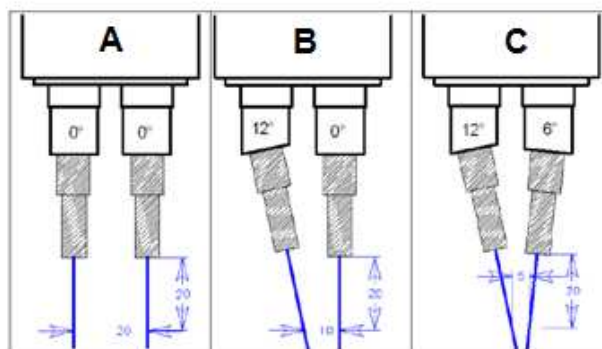


Figura 2.2 – Distância entre os eletrodos em função do modo de disposição (Anderson et al., 2006)

No mesmo trabalho de Anderson et al. (2006), no caso da soldagem de chapas de aço inox, com MIG/MAG DA, afastando os eletrodos a uma distância de 5 mm (configuração C), observaram-se geração de respingos e uma alta irregularidade do arco. Aumentando-se a distância em até 10 mm, as condições de soldagem melhoraram, mas somente no caso do uso de corrente pulsada nos dois arames. Chegando-se à distância de 20 mm entre os eletrodos, quando a atração entre os eletrodos diminuiu, foi possível se utilizar todos os tipos de transferência metálica, mas sem a eliminação completa dos respingos. Para esta aplicação, com uso da sincronização, conseguiu-se reduzir a quantidade de respingos e os autores afirmam que a defasagem teve um efeito positivo sobre a estabilidade em todas as condições.

Em outro trabalho, Hedegard et al. (2007), analisando o efeito da distância entre os eletrodos, concluíram que para uma distância de 15 mm entre os arames, a utilização da sincronização não é necessária. Esta vantagem conduz a uma maior flexibilidade na escolha do tipo de transferência metálica para cada arame. Aumentando-se mais a distância entre os arcos de soldagem, os autores destacam que se pode aumentar a DBCP de 20 mm até 30 mm, sem o aparecimento de descontinuidade em soldas. Os mesmos autores afirmam que as tochas de soldagem que têm uma distância entre os eletrodos menores apresentam limitações no uso de níveis de correntes maiores e, também, na combinação das transferências metálicas. Durante a soldagem, usando-se uma distância menor entre os eletrodos e ajustando-se os valores de correntes de soldagem mais altas, as forças de

atração entre os arcos tornam-se maiores. Neste caso, o uso de um ângulo de ataque em eletrodos pode provocar mordeduras.

Ueyama et al. (2006) investigaram a influência da distância entre os eletrodos e como esta reage sobre o número de picos anormais de tensão, na soldagem de chapas finas de aço de baixo carbono, com espessura de 3,2 mm. Na soldagem com a distância entre os eletrodos de 5 mm, o número de tensões anormais apresentou um valor zero para os dois eletrodos. Com um aumento de até 10 mm entre os eletrodos, os autores observaram que o arame líder apresentou 38 picos anormais e um número de 89 picos para arame seguidor. Entretanto, quando a distância foi aumentada para 20 mm, observou-se um decréscimo, até zero pico anormal para arame-líder e 11 para arame-seguidor como pode ser observado na Fig. 2.3.

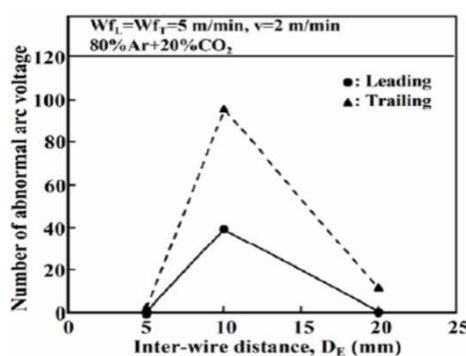


Figura 2.3 – Apresentação dos números de picos anormais apresentados por Ueyama et al. (2006)

Usando-se as características do processo DA para uma aplicação específica prática, Ogawa et al. (2004) estudaram a possibilidade de uso do processo DA em uma configuração de soldagem em chanfro estreito, com 75 mm de profundidade e 10 mm de largura. Regulando-se uma distância entre eletrodos de 8 mm a 35 mm, obteve-se uma taxa de deposição de 6,3 g/cm. No caso do uso da distância entre os eletrodos de 8 mm, observaram-se flutuações dos arcos e a poça metálica tornou-se instável. Já com a distância de 30 mm entre os eletrodos obtiveram-se duas poças separadas, fato que conduziu à acumulação da escória entre os passos. No final, concluiu-se que a distância de 25 mm é a adequada para se executar soldas em condições estáveis. Com base nestas condições utilizadas, os cordões de soldas obtidos apresentaram geometria adequada para aplicações práticas na soldagem multipasse.

## 2.6 Corrente de soldagem no processo MIG/MAG DA

Durante os experimentos sobre a influência do valor da corrente em cada arame sobre a estabilidade do cordão de solda, Ueyama et al. (2005) concluíram que se pode obter uma velocidade máxima de soldagem (de 4 a 4,5 m/min) quando a relação entre  $I_T/I_L = 0,3$  a  $0,5$ . Mudando-se a relação entre as correntes para  $I_T/I_L = 1,3$  ( $I_T=290$  A;  $I_L=220$  A), a poça metálica entre os arames tornou-se muito instável. Em conformidade com os resultados, os autores fizeram as seguintes afirmações:

- A força do arco-seguidor faz a pressão sobre o fluxo do metal líquido fundido pelo arco-líder;
- A superfície sólida induzida pela força do arco-líder é preenchida por metal líquido do arco seguidor, garantindo, desta maneira, a estabilidade da poça de fusão entre os eletrodos.
- O arco-seguidor não induz nenhuma superfície sólida.

OHNAWA et al. (2003) analisaram a influência do valor da corrente do arame seguidor na soldagem de chapas finas com o uso de uma distância entre os eletrodos de 10 mm. Usaram os ângulos de ataques dos arames de  $9^\circ$ , puxando para o arame líder e empurrando para o arame seguidor. Para o primeiro arame usaram 400 A e no segundo arame a corrente média variou entre 100 a 250 A. Como pode ser observado na Fig. 2.4, onde são apresentados os resultados dos experimentos, com um ajuste adequado da corrente do seguidor, a velocidade de soldagem pode aumentar.

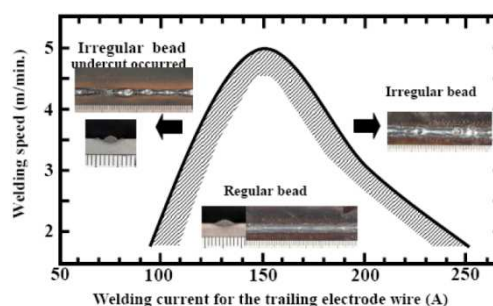


Figura 2.4 – Influência do valor da corrente do arame seguidor sobre a velocidade de soldagem OHNAWA et al. (2003)

### 2.6.1 Tipos de transferências usados no processo MIG/MAG DA

De acordo com Trommer (2009), em geral, são usados na prática os seguintes modos de transferência na soldagem com DA:

- Pulsado para os dois arames – este modo é mais frequentemente usado. A transferência metálica, na maioria dos casos, é defasada;
- A combinação do arco pulsado (arame líder) e arco convencional (corrente constante ou tensão constante, em arame seguidor): o objetivo principal deste modo é de aumentar a velocidade de soldagem;
- Arco convencional em arame líder e pulsado em arame seguidor: este modo é usado para se obter uma penetração maior.

Goecke et al. (2001) tentaram soldar com a transferência metálica por goticular nos dois arames e, devido à pressão alta dos arcos, teve como resultado uma condição de soldagem instável.

### *2.6.2 Penetração no processo MIG/MAG DA*

Motta et al. (2007) afirmam que a penetração é diretamente ligada à pressão do arco, sendo que uma maior pressão oferece uma penetração maior. Tal efeito é devido ao deslocamento do metal líquido sob a pressão do jato, o que, por sua vez, favorece a troca de calor no fundo da poça de fusão. Em outro trabalho, Motta e Dutra (2005) mostram que o aumento da corrente média e do ângulo entre os eletrodos faz a penetração e a diluição aumentarem.

### *2.6.3 Parametrização no processo MIG/MAG DA*

Yudodiboroto et al. (2006) citam que, para se encontrar os parâmetros de pulsação na soldagem MIG/MAG DA, pode-se utilizar a metodologia aplicada na soldagem MIG/MAG com único arame.

## **2.7 Sincronização das máquinas de soldagem e a defasagem no processo MIG/MAG DA**

Durante a soldagem com duplo arame, em função da distância entre os eletrodos e dos ângulos de ataque, pode ser observada a interferência eletromagnética entre os eletrodos. Alguns pesquisadores se preocuparam em como resolver o problema do sopro magnético e desenvolveram um sistema de sincronização entre as fontes. Nesta situação, emprega-se a corrente pulsada em ambas as fontes, configuração na qual uma fonte

denominada Escrava é controlada por outra, denominada de Mestre, através de um tempo de defasagem.

Opiniões de pesquisadores divergem em usar a sincronização, como usar a sincronização, e que não é necessária a sincronização.

Exemplificativamente, Motta e Dutra (2005) afirmam que a defasagem é empregada com o objetivo de reduzir as interações eletromagnéticas (sopro magnético) entre os arcos, conferindo uma maior estabilidade. Goecke et al. (2001) confirmam que para se garantir a estabilidade na soldagem MIG/MAG DA com ambos os arames trabalhando em pulsado, a sincronização é indispensável. Usando-se o modo pulsado defasado, é possível reduzir a oscilação da poça metálica do cordão. Os melhores resultados foram obtidos usando-se a duração do pulso de 1ms. No caso da soldagem sem uso da sincronização, os autores observaram curtos-circuitos e geração de respingos. Ueyama et al. (2005) usaram uma defasagem que consiste em um atraso da corrente de pulso do arame-seguidor em 0,5 ms, para o arco não apagar.

Já Motta e Dutra (2001) observaram que a defasagem tem efeito sobre a deflexão dos arcos elétricos, mas isto não é uma condição essencial para um bom desempenho do processo no caso do uso de níveis baixos de correntes médias, e, menos ainda, em patamares superiores. Em seu estudo sobre a defasagem, Motta e Dutra (2001) usaram três condições diferentes de defasagem do tempo nos pulsos de corrente:

- a) Defasagem total: onde os pulsos de corrente de ambas as fontes foram integralmente defasados;
- b) Pulsos em fase: os pulsos de ambas ocorrem praticamente no mesmo tempo;
- c) Meio pulso: o pulso da fonte escrava inicia logo após o início da pulsação da fonte mestre, mas antes que esta última finalizasse o seu tempo de pulso.

Os resultados dessa análise mostraram que o modo de defasagem não influencia significativamente sobre a geometria do cordão e o acabamento superficial de solda. Em outro estudo, em cordões de soldas depositados sobre as chapas, Motta et al. (2005) observaram que não houve nenhuma influência da defasagem sobre a quantidade de respingos e o surgimento de discontinuidades, como a porosidade.

Ueyama et al. (2009) citam que a interferência magnética entre os eletrodos pode ser reduzida por intermédio do controle do tempo de defasagem. Os autores avaliaram a influência do tempo de defasagem sobre a quantidade de picos anormais de tensão e sobre as interrupções dos arcos de soldagem. Concluíram que o tempo de defasagem de 0,4 a 0,5 ms diminui os números de picos anormais de tensão e respectivamente da interrupção do arco (Fig. 2.5).



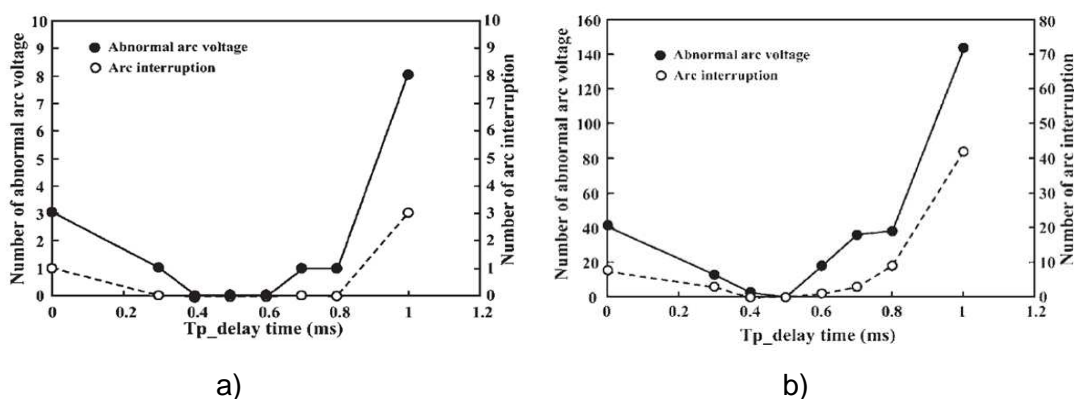


Figura 2.5 – Efeito do tempo de defasagem sobre o surgimento das tensões anormais e interrupções do arco a) arame líder, b) seguidor (UEYAMA et al. 2009)

Outros autores, Anderson et al. (2006) afirmam que a defasagem pode ser utilizada para diminuir a interação magnética e para melhorar a estabilidade do arco, na soldagem com uma distância entre os eletrodos de 8 a 11 mm. Mas em contradição com os resultados de Motta et al. (2005), estes autores observaram a redução da geração dos respingos. No mesmo trabalho, os autores afirmam que para distâncias entre eletrodos de 12 a 15 mm, a sincronização pode ser desprezada.

Apesar de ter sido relatado por alguns pesquisadores que o uso da defasagem é necessário na soldagem com o processo MIG/MAG DA, Yudodibroto et al. (2006) afirmam o contrário, justificando não haver necessidade de se utilizar a defasagem. Na soldagem MIG/MAG com DA de uma liga de Al T351, utilizando-se chapas de 12,7 mm de espessura, Pickin et al. (2009), para evitar o uso da sincronização, combinaram os modos de transferência metálica entre os arames. O arame-líder trabalhou no modo goticular e o arame-seguidor no modo pulsado. Mais do que isso, de acordo com Scotti et al. (2006), na soldagem MIG/MAG com duplo arame, podem ser usadas fontes convencionais; portanto, sem defasagem, ao invés de fontes sofisticadas com sistemas complexos de sincronização, o que reduz significativamente o custo de equipamento.

## 2.8 Gás de Proteção no processo MIG/MAG DA

Regulando uma distância de 10 mm entre os eletrodos, Ueyama et al. (2006) estudaram o efeito da porcentagem de  $CO_2$  em mistura de Ar- $CO_2$  sobre o surgimento do número das tensões anormais durante a soldagem. Na Fig. 2.6 estão demonstrados os resultados dos testes. Pode-se observar que com aumento da porcentagem de  $CO_2$  aumenta-se a instabilidade do processo.

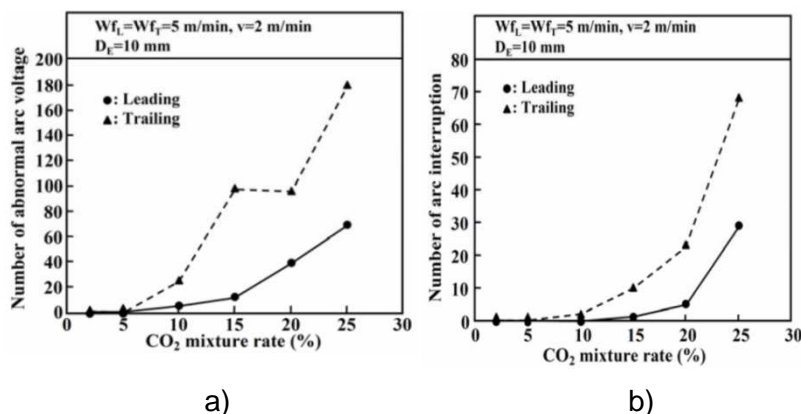


Figura 2.6 – O efeito da porcentagem do CO<sub>2</sub> sobre: a) número de tensões anormais, b) interrupções do arco (UEYAMA et al., 2006)

## 2.9 Tipos de descontinuidades no processo MIG/MAG DA

De acordo com Ueyama et al. (2005) e Yudodiboroto et al. (2006), na soldagem de alta velocidade com o processo MIG/MAG DA, a mordedura e a costa de dragão são as descontinuidade mais comumente encontrados. Ueyama et al. (2005) afirmam que a mordedura e a costa de dragão são causadas pelo fluxo irregular de metal líquido na direção da parte posterior da poça de fusão. Este fluxo irregular pode ser eliminado através da inclinação do arame-seguidor em 5 a 13° (empurrando) e usando-se uma distância entre os arames de 9 a 12 mm.

Outros tipos de descontinuidades encontradas por Farajian-Sohi e Jarvstrat (2005) foram do tipo "colo frio" (coldlap em inglês). De acordo com os autores, estas pequenas descontinuidades se localizam no pé da solda (weld toe) e podem ser considerados como concentradores de tensões e pontos de iniciação de trinca de fadiga. Os fatores responsáveis pela formação de "colo frio" são a velocidade de alimentação e aposição da tocha de soldagem. Infelizmente, os valores baixos desses parâmetros aumentam a possibilidade de se obter o "colo frio", enquanto os valores altos aumentam a geração de respingos.

Li et al. (2010) investigaram a ocorrência de descontinuidades do tipo "colo frio" na soldagem MIG/MAG Duplo Arame e classificou tais descontinuidades em três grupos:

- "colo frio" causado por respingos, o que ocorre quando a distância do centro do respingo até a linha de fusão do cordão de solda é menor do que o raio do respingo (Fig. 2.7(a));

- "overlap induced" representa uma quantidade de material de base que se solidificou sem fusão completa com (Fig. 2.7(b));
- um tipo misto de "colo frio" e "overlap induced" que ocorre quando a distância de margem da solda até o centro do defeito é menor do que raio do defeito (Fig. 2.7(c)).

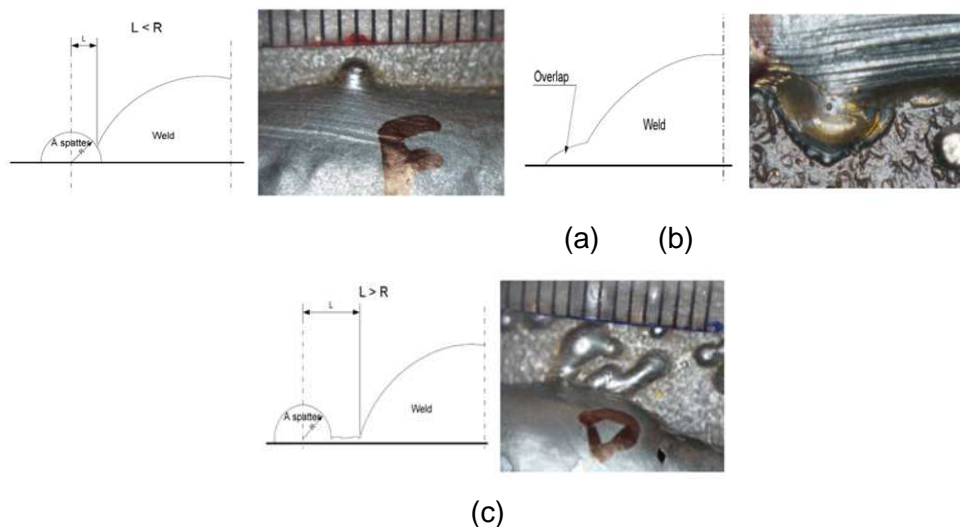


Figura 2.7 – Descontinuidade de tipo colo frio: a) colo frio, b) overlap induced, c) tipo misto de "colo frio", Li et al. (2010)

Para se evitar as descontinuidades do tipo colo frio, precisa-se diminuir a quantidade de respingos gerados durante a soldagem.

Na soldagem com MIG/MAG DA de aços HSLA 65, chapa de 11 e 8 mm e CSA 350, chapa de 9,5 mm, usando arame de soldagem ER70S-6 e como gás de proteção 16%  $\text{CO}_2$ , 2,75%  $\text{O}_2$  e 81,25% Ar, Sterjovski et al. (2012) observaram trincas de solidificação. Este tipo de trinca, na soldagem de chapa com espessura de 11 mm, possui tamanho menor do que aquelas observadas na soldagem de chapas de 8 e 9,5 mm. Os autores justificam o menor tamanho de trincas nas chapas de 11 mm através de uma maior relação profundidade/largura e uma quantidade menor de Ni, que contém o metal de base (até 4 vezes menor do que em chapas de 8 mm de espessura e 10 vezes para no caso da chapa 9,5 mm espessura). Acredita-se que a quantidade maior de Ni aumenta a tendência de se obter as trincas de solidificação, por alargar a zona TRB (a área imediatamente após a zona completamente líquida da poça de fusão). Além disso, combinando com enxofre, formam-se composições com baixo ponto de fusão.

## **2.10 Soldagem fora de posição no processo MIG/MAG DA**

De acordo com Purslow et al. (2009), o Edison Welding Institute aplicou o processo MIG/MAG Duplo Arame na soldagem de chapas de grande espessura nas posições horizontal, vertical e sobrecabeça. Na soldagem em posição horizontal, obteve-se uma taxa de deposição de 11,4 kg/h e uma velocidade de soldagem de 76,2 cm/min (acréscimo em 195% e 185%, respectivamente, quando comparado com MIG/MAG convencional). Nesta posição, observou-se que diminuiu o calor imposto com 33%. Na soldagem vertical, observaram-se taxas de deposição maiores do que 3,6 kg/h (comparando com soldagem com único arame aumentou a produtividade em 75%). Já na soldagem sobrecabeça, observou-se taxa de deposição de 6,8 kg/h com uma velocidade de soldagem de 0,7 m/min (aumento de 235% e 535%, respectivamente, quando comparado com um único arame), conseguindo-se reduzir o percentual de calor imposto também em 33%. Os autores afirmam que a soldagem com a velocidade alta traz benefícios como, aumento da produtividade, diminuição de tensões e distorções resultantes.

## **2.11 Tipos de DA, modificações para aumento da produtividade do processo MIG/MAG DA**

Uma solução de aumento da produtividade, apresentada por Yapp e Blackman (2004), é o sistema automatizado de soldagem dos passes de enchimento de dutos – CAPS, desenvolvida pelo Centro de Pesquisa em Engenharia de Soldagem da Universidade Cranfield, que usa duas tochas duplo arame (dual-tandem) em um mesmo suporte. Esta configuração faz a taxa de deposição aumentar duas vezes, assim como a velocidade de soldagem, em comparação com DA, fato que conduz para a redução de execução dos números de passes necessários para se preencher uma junta e, conseqüentemente, causa uma redução no tempo de estacionamento para se fazer uma solda completa. No final, resulta em um tempo menor de execução, o que leva a uma maior economicidade. Comparando-se com o sistema convencional de soldagem dos tubos com um arame nesta configuração, resulta-se numa economia de 25%. Apresentando flexibilidade, este sistema pode ser usado tanto com uma tocha DA, quanto com duas tochas DA. Os autores analisaram as curvas de resfriamento no caso do uso de uma tocha e no caso da soldagem com duas tochas. Observaram que nos dois casos, o ciclo térmico é aproximadamente igual, tendo em vista que a velocidade de soldagem para o sistema com duas tochas era de duas vezes maior.

Outra proposta para o aumento da produtividade foi apresentada por Arita et al. (2006). Em seu trabalho, desenvolveram uma variante de soldagem com três arames (Fig. 2.8) para soldagem de uma solda de filete. Usando o processo com duplo arame, colocaram entre dois arames tubulares, com o diâmetro de 1,6 mm, um terceiro arame aquecido pela passagem de uma corrente de polaridade negativa (arame quente). Esta configuração diminui a interferência eletromagnética entre os eletrodos líder e seguidor (os dois arames usam polaridade positiva).

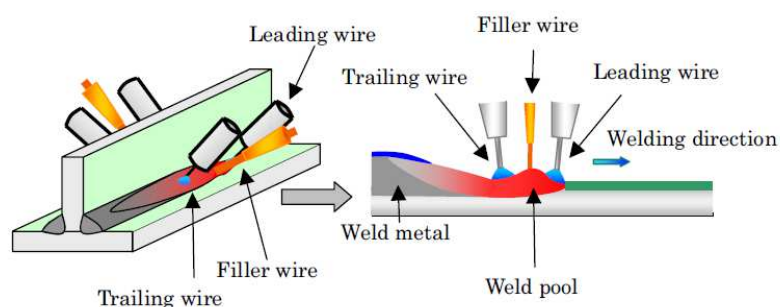


Figura 2.8 – Esquema do processo com três eletrodos, desenvolvido por Arita et al. (2006)

Os resultados da pesquisa de Arita et al. (2006) confirmam que na soldagem de uma solda de filete na posição horizontal, usando-se uma velocidade de soldagem de aproximadamente 2 m/min, o processo com três eletrodos apresenta condições de estabilidade melhores e menos interferência magnética entre os eletrodos. Também, o processo reduz a geração das descontinuidades e das porosidades.

Utilizando a flexibilidade do processo e combinando com outro processo de soldagem para melhorar as performances, Reis et al. (2011) propõem a combinação do DA com o processo de soldagem por laser. Os autores estudaram qual seria a distância mais adequada entre os eletrodos do processo DA no caso do posicionamento do laser entre os arames. O resultado final dessa combinação apresenta um aumento da penetração, e da velocidade de soldagem. Outra característica apresentada por este processo híbrido é a melhora da aparência dos cordões de soldas. Os autores afirmam que os melhores resultados podem-se obter quando a distância entre os eletrodos é de 10 mm.

## 2.12 Tipos de Curto-Circuito Controlado

Todos os tipos de processos por curto-circuito têm em comum o objetivo de estabilizar as condições de soldagem ao arco, para o aumento da qualidade e da produtividade. De

acordo com Silva et al. (2007), o desenvolvimento da técnica de soldagem por curto-circuito controlado foi apoiada em pesquisas que procuravam um processo com as vantagens da transferência metálica por curto-circuito (menor calor imposto e menor nível de tensões residuais, menor gasto de energia, menor nível de hidrogênio difusível, eliminando-se os efeitos indesejáveis do processo convencional, como geração excessiva de respingos e irregularidade na transferência metálica). Dutra e Silva (2008) descrevem o princípio de destacamento da gota para o processo MIG/MAG e apresentam os motivos pelos quais surgiu a necessidade de desenvolvimento do sistema de controle da corrente. Silva et al. (2007) apresentam ainda os vários tipos de ondas existentes que usam o controle do valor da corrente de curto-circuito (Fig. 2.9). Esses autores afirmam que, se usando o modo de controle por curto-circuito controlado, conseguiu-se soldar chapas de 0,2 mm de espessura.

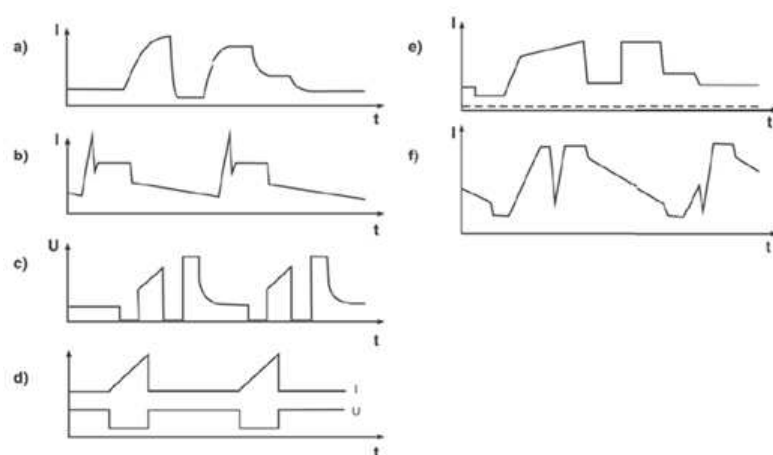


Figura 2.9 - Formas de onda de corrente (I) dos vários tipos de curto-circuito controlado, Silva, Dutra e Gohr (2007 apud a) Wohlfahrt et al., 2003, b) Wohlfahrt et al., 2003, c) STT-Stava, 1999, d) Eassa, 1983 e) MILLER, 2004; f) Maruyama, 1995)

Stava (1999) relata que o processo SST (Surface Tension Transfer) foi integrado com sucesso na soldagem orbital automatizada dos dutos, obtendo-se soldas com boa qualidade e baixo teor de hidrogênio. O processo oferece um bom controle sobre a corrente de soldagem e do calor imposto. Com o uso do STT, de acordo com Stava (1993), reduzem-se os custos de soldagem, gerando-se menos respingos e fumos, e apresentando-se bons resultados na soldagem com 100% de  $\text{CO}_2$ .

O STT apresenta a possibilidade de se obter passos de raiz em até 3 a 4 vezes mais rápido do que com MIG/MAG convencional, com baixo calor imposto e sem apresentar falta de fusão. De acordo com DeRuntz (2003), a perspectiva do controle do calor apresentada por este processo, permite fazer soldas em chapas galvanizadas, sem queima da

galvanização na parte oposta do material. Uma desvantagem do processo é que as fontes de soldagem são mais caras em comparação com as fontes de soldagem com tensão constante. O mesmo autor afirma que a taxa de deposição é inferior à de soldagem com a transferência metálica globular, goticular e pulsado, mas apresentam valores iguais como aqueles do curto-circuito. O modo de regular os parâmetros de soldagem é bastante diferente, se comparado àquele utilizado num processo convencional.

Outro processo de controle com curto-circuito controlado, o CCC, desenvolvido pela IMC Brasil, foi testado por Silva et al. (2005) na soldagem de passe de raiz de dutos. O processo apresenta vantagens como menos respingos (Fig. 2.10), menos fumos, melhor controle da poça, baixa suscetibilidade para as descontinuidades de soldagem, melhores geometrias de cordões em comparação com a soldagem com o eletrodo revestido. De acordo com Silva e Dutra (2009), em contraste com as vantagens apresentadas pelo processo CCC, o número alto de parâmetros de soldagem faz o processo de parametrização ser mais complexo.



Figura 2.10 – Quantidade de respingos gerada durante a soldagem com  $\text{CO}_2$  puro a) CCC e b) MIG/MAG convencional, ambos com  $\text{CO}_2$  puro como gás de proteção

Em uma aplicação da soldagem com CCC, de acordo com Gonçalves et al. (2005), com o aumento do tamanho da gota aumenta a penetração (Fig. 2.11). Os autores relataram a hipótese de que, para maiores volumes da gota, em que há um maior período de arco aberto e um maior tempo em corrente alta, há um maior efeito de vórtex, aumentando a eficiência na transferência de calor para o material de base, tanto pela gota, quanto pelo próprio arco.

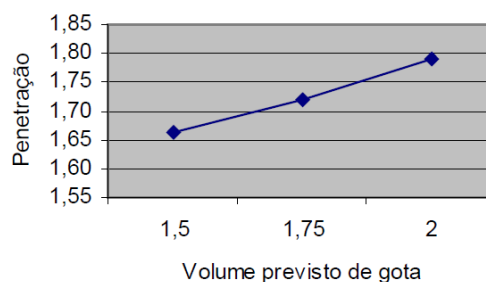


Figura 2.11 – O Efeito do volume de gota ( $\text{mm}^3$ ) sobre a penetração (mm), (GONÇALVES et al., 2005)

Analisando-se comparativamente os processos CCC e STT, Dutra e Silva (2008) afirmam que o sistema STT apresenta diferenças nas formas de onda (Fig. 2.12), o que conduz a uma frequência maior de destacamento da gota no caso do STT, do que no CCC. O CCC apresentou gotas maiores.

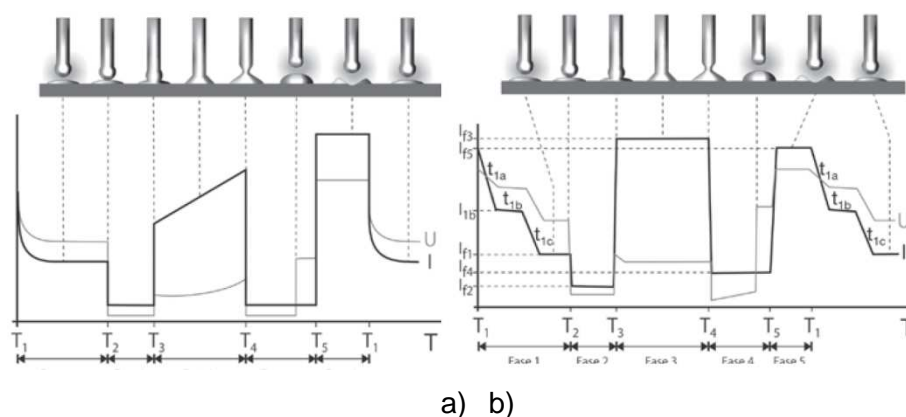


Figura 2.12 – O formato de onda a) STT, b) CCC, (DUTRA; SILVA, 2008)

Durante as medições dos valores de corrente, o CCC apresentou menor corrente média (135 A) e maior corrente eficaz (164 A), uma diferença de aproximadamente 29 A, enquanto que no STT, a diferença é de 15 A. No caso do cálculo da potência do arco, o sistema STT apresenta um erro pequeno, 2242 W contra 2251 W; mas no caso do CCC se obteve 2308 W por intermédio dos valores médios de corrente e tensão, contra 2718 W.

O Controlled Bridge Transfer (CBT), cujo formato é mostrado na Fig. 2.13, é outro processo de soldagem com curto-circuito controlado, que tem os mesmos princípios de funcionamento dos outros processos que usam o controle da corrente de curto-circuito. Este processo, apresentado por Era et al. (2006), foi desenvolvido para a soldagem de chapas finas nas indústrias de automóveis e motocicletas, para a redução dos respingos e custos associados à remoção dos mesmos.



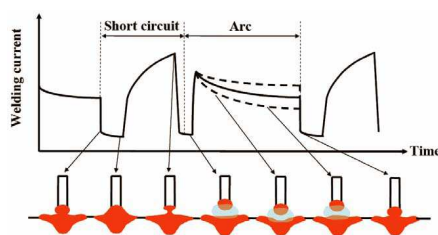


Figura 2.13 - O formato de onda do Controlled Bridge Transfer (CBT), (ERA et al., 2006)

Era et al. (2013) apresentam o objetivo do desenvolvimento do CBT. Os autores explicam que, na soldagem com MIG/MAG em corrente baixa convencional, os respingos ocorrem exatamente depois da reabertura do arco, depois do curto-circuito. Para reduzir os respingos, foi proposto detectar-se um fenômeno durante o curto-circuito para a diminuição rápida da corrente de curto-circuito, imediatamente antes da reabertura do arco, o que faz o metal derretido ser transferido pela força, devido à tensão superficial.

Outra abordagem apresentada por Era et al. (2006) é o uso do processo CBT na soldagem em polaridade negativa. Em experimentos de comparação da corrente de soldagem com o uso da polaridade negativa, o valor da corrente foi de  $2/3$  da observada em polaridade positiva, e apresentou uma mesma taxa de deposição. Em outras palavras, na soldagem com a polaridade negativa, conseguiu-se fornecer menos calor imposto para se obter a mesma taxa de deposição da polaridade positiva. Os autores confirmam a soldagem das chapas sobrepostas de 0,7 mm de espessura com CBT em polaridade negativa, situação na qual resultaram cordões regulares sem respingos.

Os sistemas correspondentes de soldagem envolvem mecanismos de controle diferentes dos parâmetros de soldagem ao longo das fases sensíveis. Outro processo proposto para a soldagem com curto-circuito controlado é o CMT 'Cold Metal Transfer' (Fig. 2.14), que cada vez se expande em aplicações, conferindo benefícios técnicos e econômicos. Egerland (2012) afirma que o princípio de destacamento da gota por meio mecânico, transferência característica do CMT, foi aplicado em 1991 para a soldagem de materiais dissimilares como aço e alumínio. O processo foi disponibilizado no mercado a partir de 2002.

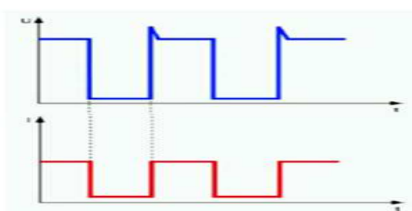


Figura – 2.14 O formato da onda do CMT, (EGERLAND, 2012 apud HACKL; HIMMELLBAUER, 2005)

Podem se citar como as principais vantagens tecnológicas do CMT:

- Alta estabilidade do processo, mesmo com a variação das outras condições;
- Introdução de energias térmicas menores em material de base;
- Redução do empenamento e das distorções;
- Redução da quantidade de respingos gerados;
- Melhora da qualidade das soldas;
- Redução do custo operacional e aumento da eficiência.

Um novo conceito do processo, que apresenta a possibilidade de se aplicar o princípio de destacamento da gota por meio mecânico e elétrico, para melhorar as condições de soldagem, é o processo chamado de 'CMT Advanced', lançado em 2009. Neste processo, uma corrente alternada se sobrepõe sobre o controle mecânico dos períodos. Esta é uma vantagem tecnológica de trocar a polaridade dos eletrodos com a aplicação da corrente alternada (CA). O formato de onda está apresentado na Fig. 2.15.

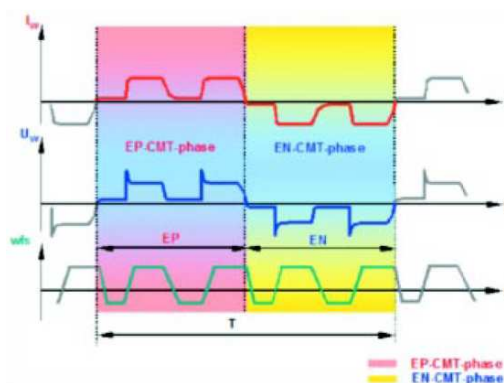


Figura 2.15 – O formato de onda do CMT Advanced, (Egerland, 2012 apud KAZMAIER; STIEGLBAUER; EGERLAND, 2010)

Dean et al. (2006) desenvolveram um sistema de controle da corrente independente da fonte de soldagem, que pode ser usada na soldagem com inversores convencionais, para o controle da transferência metálica, enquanto minimiza os respingos. O sistema de controle alternativo foi desenvolvido para transferência controlada para o processo MIG/MAG. Baseou-se na premissa de que a tensão superficial deve ser a força principal responsável para o destacamento da gota, ao invés do mecanismo eletromagnético da força pinch. Basicamente, a técnica de controle alternativa é uma metodologia de diminuição da corrente de curto-circuito, diminuindo o nível alto da corrente de curto-circuito para níveis menores do que aqueles geralmente encontrados no uso da técnica de controle da tensão.

No momento do curto-circuito, o controle reduz a corrente para permitir que a gota entre em contato com a poça de fusão através da força devida à tensão superficial. Depois que a gota entra em contato com a poça metálica, a corrente de curto-circuito aumenta até antes do destacamento da gota, o que limita a passagem da corrente no tempo de destacamento da gota, minimizando a força elétrica exclusiva, reduzindo significativamente a geração dos respingos. Depois do destacamento da gota, o arco é restabelecido e, acompanhado pela corrente de pulso, rapidamente produz o “burn-back” do eletrodo, para evitar a possibilidade de iniciar o curto-circuito. O formato de onda do sistema de controle alternativo da corrente está apresentado na Fig. 2.16.

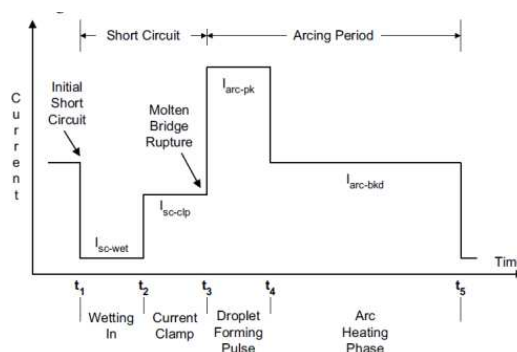


Figura 2.16 - O sistema alternativo de controle da corrente, (Dean et al., 2006 apud NORRISH et al., 2003)

### 2.13 Modos de uso do Curto-Circuito em combinação com outros processos

Atualmente, na área de soldagem tem-se a tendência de se utilizar processos de soldagem cada vez mais econômicos e que, ao mesmo tempo, aumentem a qualidade e a produtividade das soldas. Staufer (2012) avaliou o uso de CMT na soldagem MIG/MAG DA. Foi proposta uma nova combinação, em que o arame-líder trabalha com corrente pulsada e o arame-seguidor com CMT. O autor destaca que, para CMT Twin, não há necessidade de se usar sincronização. Isso acontece devido à alta frequência de transferência metálica (até 100 gotas por segundo), que leva a condições mais estáveis de soldagem. Durante a soldagem, foi observado que a interação magnética no caso do CMT Twin é menor comparada com MIG/MAG Convencional. Na soldagem em altas velocidades com DA convencional, usando-se o modo Pulsado, há risco de se gerar mordeduras, falta de fusão e porosidade. Mas, com o uso do CMT Twin, estas descontinuidades podem ser eliminadas. As vantagens do CMT Twin, observadas pelo autor, são:

- Alta estabilidade energética;

- Interação magnética menor;
- Menos respingos;
- Melhora do desempenho na soldagem de grandes aberturas na raiz;
- Aumento da velocidade de soldagem.

Mantendo a tendência de aumentar a produtividade e a qualidade das soldas, Frostevarg et al. (2013) experimentaram o uso do CMT (CMT na frente, usando um ângulo de ataque puxando), em combinação com o processo de soldagem por laser, para a soldagem de chapas finas. Os resultados desse trabalho (Fig. 2.17), em comparação com o processo híbrido que utiliza a corrente pulsada, apresentaram melhor estabilidade da poça de fusão, mordeduras menores e menos calor imposto. Com o uso do CMT, o processo híbrido apresentou menos variações na soldagem com velocidades variadas.

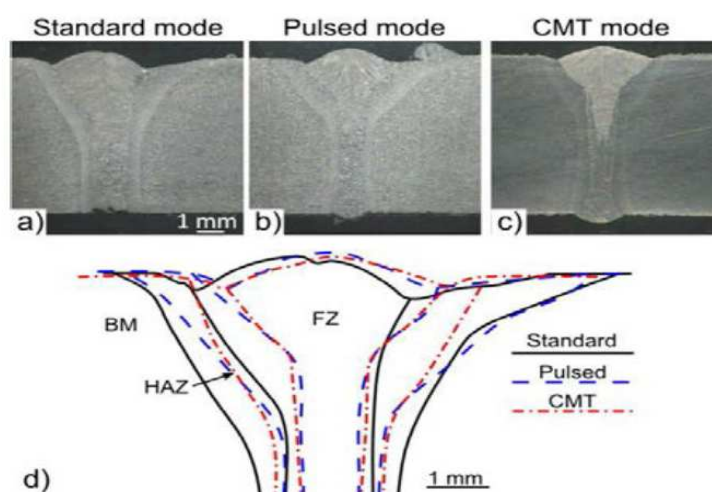


Figura 2.17 – A seção transversal das soldas na soldagem híbrida com Laser e: a) MIG/MAG standard, b) Pulsado e c) CMT; d) A ZAC de todas as soldas sobrepostas (FROSTEVARG et al., 2013)

## CAPÍTULO – III

### EQUIPAMENTOS, INSUMOS E METODOLOGIA

#### 3.1 Bancada de soldagem

Para desenvolvimento do projeto, foi montada uma bancada de soldagem apresentada na Fig. 3.1.




Figura 3.1 – Bancada de soldagem: (1) duas fontes de soldagem (DIGITEC 600 e DIGIPlusA7), com os respectivos alimentadores de arame; (2) tocha de soldagem duplo arame TBI; (3) mesa de coordenadas x-y; (4) computador de controle da mesa X-Y; (5) sistema de aquisição e monitoramento de corrente e tensão; (6) sistema de refrigeração da água da tocha; (7) cilindro de gás de proteção

##### 3.1.1 Fontes de soldagem

Durante os experimentos como processo MIG/MAG duplo arame no modo Pulsado-Pulsado, foram utilizadas duas fontes de soldagem DIGITEC 600, cujas características são mostradas na Tab. 3.1, e dois alimentadores de arame do modelo STA-20, cada um

contendo quatro roletes tracionadores, com a possibilidade de regular a alimentação entre 0,10 a 20,00 m/min. Estes tipos de cabeçotes oferecem a regulação das rampas de aceleração e desaceleração do arame, melhorando as condições de início e término dos cordões de solda. O motivo pelo qual foram utilizadas essas fontes para soldagem no modo Pulsado-Pulado foi a possibilidade de sincronizar as máquinas. Durante os experimentos, foi usada uma defasagem dos pulsos de corrente de 5,8 ms para fonte escrava.

Tabela 3.1 – Características técnicas das fontes MTE Digitec 600


	Faixa de Corrente	5 a 600 A
	Tensão em Vazio	64 V
	Alimentação	220, 380, 440 V - 3 Ø
	cos fi	0,95
	Dimensões	500 x 600 x 600 mm
	Peso	150 kg

No caso da soldagem com Curto-Circuito Controlado no arame seguidor, utilizou-se a fonte MTE Digitec 600 para arame líder e uma fonte DIGIPlus A7 para arame seguidor. O DIGIPlus A7 é uma fonte de soldagem capaz de gerar várias formas de ondas, dentre elas, o curto-circuito controlado. O sistema de controle desse equipamento é baseado num micro-controlador ARM 7 de 32 bit (IMC, 2012), o qual possibilita toda a operação da fonte através apenas de “software”. Isto possibilita desenvolver programas especiais para cada aplicação. As principais características da fonte são mostradas na Tab. 3.2. O sistema tracionador do equipamento também possibilita a alimentação de arame bobinado de diversos tipos, com velocidade regulada de 1,0 a 20,00 m/min. Uma de suas principais características é a possibilidade de alimentação de arame com velocidade pulsada.

Antes de se fazer os testes, foi feita a calibração da velocidade de alimentação para todos os cabeçotes das fontes de soldagem. Foi utilizada uma régua composta por um tubo fixado num suporte que tem duas interrupções. Quando o arame passa pela interrupção inicial do tubo, a chave liga o cronômetro. Depois, que o arame alcança uma distância conhecida (0,787 m) e passa pela extremidade final onde está posicionada a chave de final de curso, o cronômetro para. O esquema de funcionamento da régua está mostrado na Fig. 3.2. Desta maneira, podemos verificar a diferença entre velocidade da alimentação de

arame nominal (ajustada na fonte) e velocidade de alimentação de arame obtida. Os gráficos da calibração são mostrados no Apêndice I.

Tabela 3.2 – Características técnicas da fonte DIGIPlus A7

	Capacidade da corrente	450 A
	Tensão de alimentação trifásica	220/380/440
	Tensão em vazio (configurável de fábrica)	50/68/85 V
	Corrente a 100 % de fator de carga	280 A
	Potência nominal	10 kVA
	Faixa de corrente	5 - 450 A
	Corrente de entrada nominal por fase (220/380/440)	26/15/13 A
	Ripple de corrente	8 A
	Fator de Potência	0.94

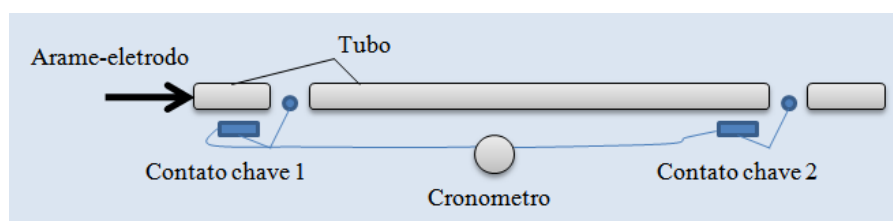


Figura 3.2 – Esquema da régua de calibragem

### 3.1.2 Tochas de soldagem

Para o desenvolvimento do trabalho, foram utilizadas duas tochas de soldagem duplo arame para o processo MIG/MAG. Para a soldagem de passes de enchimento de uma junta de topo na posição plana, foi usada a tocha BINZEL. Em outros casos, de soldagem de chapas finas em junta sobreposta na posição plana e soldagem de um passe de enchimento na posição sobrecabeça, foi usada a tocha TBI D9.

A tocha Binzel apresenta a possibilidade de regular a distância entre os eletrodos de 15 até 25 mm. Durante os experimentos feitos com a tocha Binzel foi usada a distância entre



os eletrodos de 15 mm. A tocha duplo arame TBI D9 tem uma distância entre os eletrodos fixa de 10 mm. A Fig. 3.3 ilustra o paralelismo entre os arames. As duas tochas têm dois sistemas de refrigeração separados, uma para a tocha e cabeçote da tocha, e outra para o bocal.

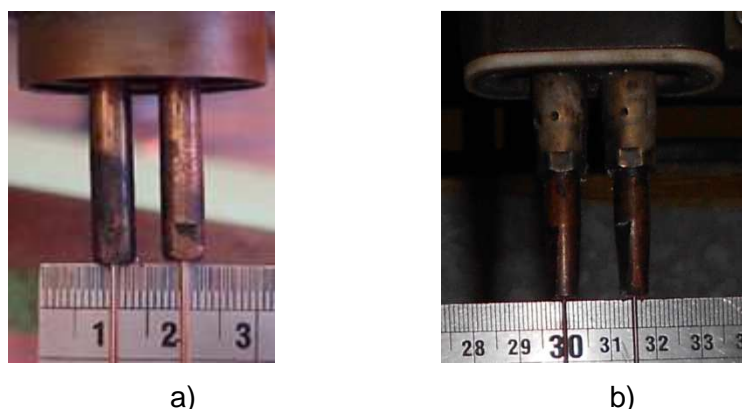


Figura 3.3 – Distância entre os arames-eletrodo: (a) tocha TBI; (b) tocha Binzel

### 3.1.3 Mesa de coordenadas ortogonais X-Y

A mesa de coordenadas X-Y foi usada para fixação e movimento da tocha. Este tipo de mesa permite programar trajetórias lineares na sua unidade de controle (neste caso é usado um computador), de forma unitária (trecho reto) ou sequencial (trechos com mudanças de direção). As características da mesa de coordenadas são apresentadas na Tab. 3.3.

Tabela 3.3 – Características da mesa de coordenadas X-Y

Comprimento do eixo X	1000 mm
Comprimento do eixo Y	570
Velocidade de soldagem	0,5-80 mm/s
Resolução na velocidade de soldagem	0,01 mm/s

Antes de usar a mesa para soldagem, foi feita a calibração da velocidade de soldagem na direção usada durante todos os experimentos (eixo X). Para calibração da velocidade de movimento da tocha, foram utilizados um magneto fixado na tocha, dois sensores magnéticos e um cronômetro digital para adquirir o tempo de deslocamento da tocha, dentro de uma distância de 500 mm (Fig. 3.4). A construção da curva de calibração é apresentada no Apêndice II.



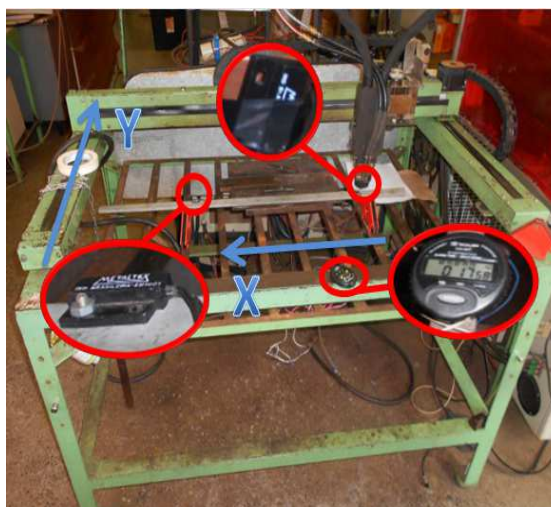


Figura 3.4 – Instrumentação para calibração da velocidade de soldagem

#### 3.1.4 Fixação das chapas

Durante os experimentos foram usados dois suportes para fixação das chapas. Um para posição plana e outro para soldagem na posição sobrecabeça. A fixação foi feita para garantir um bom travamento, impedindo que as chapas se deformassem durante o processo de soldagem. Para soldagem na posição plana foi usado o sistema de fixação mostrado na Fig. 3.5. Para soldagem sobrecabeça foi usado um suporte multi-posicional que será apresentado no item 6.1.

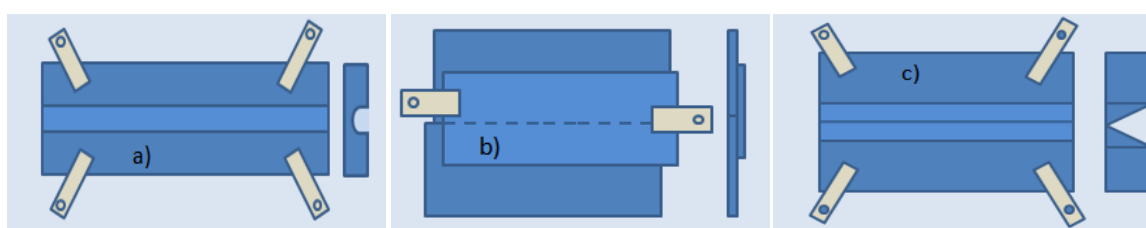


Figura 3.5 – Sistema de fixação das chapas na posição plana: a) soldagem de um passe de enchimento; b) soldagem de chapas finas juntas sobrepostas; c) soldagem multipasse

#### 3.1.5 Sistema de aquisição e monitoramento da corrente e tensão

A função do sistema de aquisição e monitoramento da corrente e tensão foi de adquirir os parâmetros de soldagem, como corrente e tensão, e monitorá-los. A aquisição foi feita através de uma placa A/D, conectada em um computador via USB (Universal Serial Bus).

Para visualização dos sinais adquiridos, utilizou-se um programa computacional específico *LabVIEW*<sup>®</sup>, que permite a interface gráfica com o usuário, apresentando os sinais adquiridos e com opção de salvá-los em formato texto para uma análise posterior. As principais características dessa placa de aquisição são apresentadas na Tab. 3.4.

Tabela 3.4 - Características da placa de aquisição de dados da National Instruments<sup>®</sup>, modelo NI USB-6009

Entradas analógicas		Saídas analógicas	
Canais single-ended	8	Canais	2
Canais diferenciais	4	Resolução	12 bits
Resolução	14 bits	Tensão máxima	5 V
Taxa de amostragem	48 kS/s	Faixa máxima de tensão	0 V, 5 V
Throughput (todos canais)	48 kS/s	Exatidão na faixa máxima de tensão	7 mV
Faixa máxima de tensão	-10 V, 10 V	Faixa mínima de tensão	0 V, 5 V
Exatidão máxima da tensão	138 mV	Taxa de atualização	150 S/s
Faixa mínima de tensão	-1 V, 1 V	Drive de corrente, individual	5 mA
Exatidão mínima de tensão	37,5 mV	Drive de corrente,	10 mA
Quantidade de faixas	8		
Memória on-board	512 B		

Para se fazer a aquisição dos sinais de soldagem com a placa A/D acima descrita, é necessário se usar condicionadores de sinais, completando o sistema de aquisição. Isto por que a placa A/D usada só mede tensão, na faixa de -10 V a 10 V.

Para medir os sinais de referência, usou-se um alicate para medição de corrente e um multímetro. Para simular a carga de soldagem, usou-se um banco de carga constituído de um tubo longo de aço inoxidável austenítico de pequena espessura, resfriado com água. O programa computacional “Measurement and Automation”, incluído na interface da *LabVIEW* foi usado para interfacear o computador e o condicionador de sinal. Para impor diferentes correntes no banco de carga, usou-se a fonte no modo corrente constante. Para gerar diferentes tensões, usou-se a mesma fonte no modo tensão constante. Com os dados obtidos, foram construídas as curvas de calibração e obtenção dos coeficientes para o programa *LabVIEW* (Apêndice III).

Para a aquisição de dados da fonte DIGIPlus A7, foi usado um condicionador de sinais. Os cabos para aquisição de sinais da tensão foram colocados o mais perto possível da chapa de soldagem, e para se adquirir o sinal da corrente foi usado um sensor hall.

### *3.1.6 Sistema de refrigeração da tocha de soldagem*

Na soldagem com duplo arame, o calor gerado durante a soldagem é mais alto em comparação com um processo MIG/MAG convencional com um arame. O calor gerado pelos arcos e as altas correntes usadas impõem a necessidade de refrigeração da tocha (e não apenas resfriamento). A refrigeração da tocha foi feita com água refrigerada e recirculada por um refrigerador MiniChillerMecalor MCA-3-RI-220, mantendo uma temperatura entre 23-20 °C.

### *3.1.7 Equipamentos para confeccionar as placas de testes*

Depois que foi escolhido o tipo e as dimensões das placas de testes, passou-se para as etapas preliminares de preparação das placas de testes. Para o corte das chapas de testes nas dimensões requeridas usou-se uma serra de fita SAWMASTER SM330M.

Inicialmente para confeccionar o chanfro das placas de testes para soldagem de um passe de enchimento foi usado o processo de goivagem por plasma. O equipamento para goivagem por plasma, apresentado na Fig. 3.6, dispõe de uma mesa de coordenadas X-Y controlada por uma interface computacional em linguagem de CNC.



Figura 3.6 – Mesa de corte usada para goivagem por plasma

Para a operação de goivagem foi usada uma tocha de goivagem mecanizada T100M. As chapas para serem goivadas foram fixadas em um suporte desenvolvido no laboratório (Fig. 3.7) que apresenta a possibilidade de regular o nível da superfície e da altura da chapa que deve ser goivada em relação à tocha.



Figura 3.7 – O suporte usado para fixação das chapas durante a goivagem

Em final, para preparação dos chanfros foi usada a operação de usinagem por fresagem, que ofereceu a possibilidade de se obter chanfros regulares e com as mesmas dimensões na aplicação da repetitividade. Para a fresagem, usou-se uma fresadora universal TIMEMASTER 5KVIG. O procedimento de preparação das chapas de testes esta apresentado no item 4.1.1.

### *3.1.8 Balança usada para pesagem de chapas*

Para se determinar a eficiência de deposição dos processos de soldagem usados, precisou-se das massas das chapas antes e depois da soldagem. As chapas foram pesadas usando-se uma balança Shimadzu UX6200H com a resolução de 0,01 g.

### *3.1.9 Preparação das amostras e análise metalográfica*

Para a análise macrográfica, as chapas de testes foram cortadas transversalmente em três seções (início, meio, fim). Para efetuar o corte das chapas foi utilizada uma cortadeira metalográfica comercial.

Depois do corte, as amostras foram submetidas à operação de lixamento manual úmido. As lixas utilizadas foram entre 100 até 600 mesh. As amostras foram atacadas

quimicamente com o reagente Nital 10% para revelar as características geométricas do cordão de solda.

Após o ataque, as amostras foram fotografadas em macroscópio óptico, e analisadas com ajuda de um programa computacional de tratamento de imagem (ImageJ). O software permite medir as áreas selecionadas em imagem. Antes de se efetuar as medições, foi feita a calibração do programa utilizando-se como base a espessura da chapa. As características geométricas medidas foram à área transversal do cordão, a área afetada pelo calor, a largura do cordão de solda, o reforço e apenetrção.

## 3.2 Insumos

### 3.2.1 Materiais de base

Para todos os testes de soldagem foram utilizadas placas de testes de aço carbono ABNT 1020, com diferentes dimensões (largura, espessura), conforme a etapa do trabalho. As dimensões e preparação das placas de testes serão descritas separadamente, para cada condição de soldagem.

### 3.2.2 Material de adição

O material de adição utilizado foi o arame-eletrodo da classe AWS ER70S-6, com diâmetro de 1,2 mm, com a composição química nominal apresentada na Tab. 3.7.

Tabela 3.7 – Composição química do arame-eletrodo (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	0,02	0,04	0,15	0,15	0,15	0,03	0,50

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

### 3.2.3 Gás de proteção

Foi usado como gás de proteção uma mistura gasosa com composição química nominal de 92%Ar+8%CO<sub>2</sub>. Antes da soldagem, a composição química do gás de proteção

foi verificada com um analisador de composição química de mistura gasosa (Oxybaby®). A Tab. 3.8 apresenta os resultados da verificação do gás de proteção.

Tabela 3.8 – Composição química do gás de proteção

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

A vazão regulada durante a soldagem foi de 30 l/min. Antes de se iniciarem os testes de soldagens a vazão foi verificada usando-se um fluxômetro (bibímetro).

### 3.3 Metodologia

O uso da corrente pulsada na soldagem com dois arames já foi bastante discutido e avaliado na literatura corrente e pode ser caracterizado como um modo operacional flexível e estável. Pode-se caracterizá-lo como modo convencional para soldagem MIG/MAG com duplo arame. Assim, do ponto de vista metodológico, para se alcançar o objetivo do trabalho foram feitas soldagens comparativas entre o modo operacional convencional (pulsado, tanto no arame líder como no seguidor) e um modo operacional que se utiliza do CCC (curto-circuito controlado). Considerando-se que seria mais sensível se trocar o modo operacional em apenas um arame, optou-se por substituir o modo pulsado apenas no arame seguidor. Assim, o modo de comparação foi pulsado-CCC, ambos em polaridade positiva.

Para se fazer a comparação, utilizou-se a mesma corrente média em cada arame ( $\cong 280$  A no líder e  $\cong 180$  A no seguidor), mesmo a custa de diferentes taxas de deposição. Para tal, a velocidade de alimentação foi ajustada em cada arame até se obter as correntes médias desejadas. Outro parâmetro de comparação foi o mesmo volume de cordão, mesmo que para isto a velocidades de soldagem, conseqüentemente, energias de soldagem, tornem-se diferentes. 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, foi procurado se manter o volume de cordão com seção de aproximadamente de 50-60 mm<sup>2</sup>. Tem-se em mente que para os passes de enchimento em soldagens a arco almejam-se duas características:

- volume de metal adequado (não muito grande, para se evitar altas tensões térmicas; nem muito pequeno, para não demandar um grande número de passes e seus respectivos tempos mortos);

- mínima penetração no fundo e fusão nas laterais da junta.

Assim, do ponto de vista comparativo, para se efetuar esta avaliação foram mantidos constantes os seguintes parâmetros:

- 1) Mesmo diâmetro e tipo do consumível, no caso arames da classe AWS ER70S-6, de 1,2 mm;
- 2) Mesmo gás de proteção, no caso Ar+8%CO<sub>2</sub>, de grande aplicação prática;
- 3) Mesma distância bico de contato peça (DBCP), de 21 mm;
- 4) Mesmo volume de metal depositado;
- 5) Mesma distância entre arames (em função da tocha de soldagem, ver item 3.1.2);
- 6) Mesmo material da placa de teste;
- 7) Mesma geometria da placa de teste e mesmo chanfro;

Os arames da tocha usada são sempre paralelos, formando um ângulo de ataque de 90° com a superfície da peça de soldagem. Assim, a distância bico de contato da peça (DBCP) foi considerada como o comprimento do arame livre entre o bico de contato e a superfície da peça que vai ser soldada, como ilustrado pela Fig. 3.12.

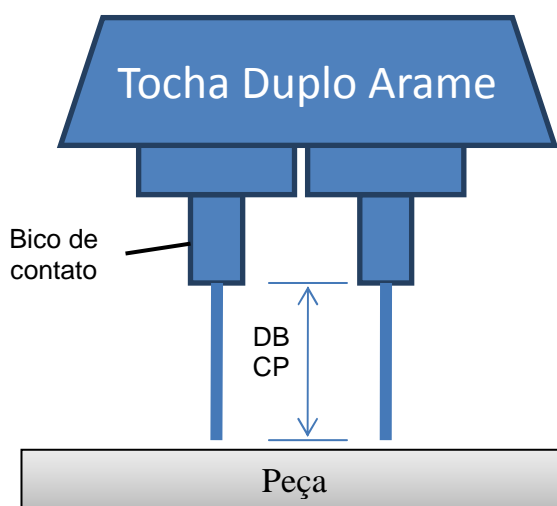


Figura 3.12 – Distância entre o bico de contato e a peça

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

- 1) Soldagem de um passe de enchimento na posição plana em chapa chanfrada simulando uma junta de topo com passe de raiz concluído;
- 2) Soldagem de multipasses de enchimento na posição plana em chapa chanfrada simulando uma junta de topo com passe de raiz concluído;
- 3) Soldagem de um passe na posição plana em junta sobreposta de chapas finas;
- 4) Soldagem de um passe de enchimento na posição sobrecabeça em chapa chanfrada simulando uma junta de topo com passe de raiz concluído.

Como critérios de comparação, foram usados o aspecto superficial do cordão, a geometria do cordão de solda (em relação à penetração, fusão lateral, convexidade do cordão, etc.), aspecto econômico (em relação à geração de respingo e velocidade de soldagem para se fazer a mesma junta) e velocidade limite de soldagem alcançável.



## **CAPÍTULO IV**

### **SOLDAGEM DE PASSES DE ENCHIMENTO EM JUNTA DE TOPO NA POSIÇÃO PLANA**

#### **4.1 Preparação experimental para soldagem de passe de enchimento na posição plana (passe único e multipasses)**

Os experimentos para avaliar o desempenho do uso do modo operacional CCC em soldagem MIG/MAG duplo arame para se fazer passes de enchimento na posição plana foram divididos em duas partes: soldagem de um único passe e soldagem multi-passes. Em ambos os casos, foi feita a comparação entre os processos MIG/MAG DA P-P (duplo arame no modo Pulsado-Pulsado), adotado como padrão, e MIG/MAG DA P-CCC (duplo arame no Modo Pulsado-Curto-Circuito Controlado).

##### *4.1.1 Preparação das placas de testes*

Para simular o passo de enchimento, procurou-se usinar sobre uma barra chata chanfros que correspondessem a uma condição em que já haveria o passe de raiz depositado e faltando o preenchimento total ou parcial da junta. Apesar de se usar a mesma lógica, do ponto de vista metodológico, esta preparação foi diferente entre as soldagens de um único ou de múltiplo-passes, sobretudo pela necessidade de maior espessura para esta última condição.

As dimensões inicialmente estabelecidas do chanfro da placa de teste para soldagem de um único passe de enchimento na posição plana foram de 4 mm profundidade e 10 mm largura. Tendo em vista estas dimensões, precisou-se escolher uma chapa com uma espessura que permitisse observar tanto a penetração do cordão de solda, quanto a geometria da zona influenciada pelo calor. Considerou-se que uma chapa com 9,5 mm de espessura garantiria estas condições (usou-se para tal barras-chata de aço comum ao carbono de 200 x 52 x 9,5 mm).

Inicialmente, tentou-se utilizar o processo de goivagem com plasma para obtenção dos canais. Antes de começar a goivar, precisou-se achar os parâmetros adequados para

goivagem e a relação entre o ângulo do posicionamento da tocha e a velocidade de soldagem para obter um chanfro com a profundidade desejada, aproximadamente 3,5 - 4 mm. Depois de alguns testes, o ângulo escolhido para o posicionamento da tocha foi de  $25^\circ$  (Fig. 4.1) e a velocidade de goivagem 700 unidade/s, com uma distância entre o bocal de saída do plasma e a chapa de 8 mm.

Para goivagem das chapas, a tocha se posicionava 17-20 mm em relação à borda da chapa, para se conseguir o chanfro iniciando-se aproximadamente de 5 a 10 mm da borda.



Figura 4.1 – Regulagem do ângulo da tocha

Com os parâmetros apresentados na Tab. 4.1 conseguiu-se obter um chanfro com dimensões: 7 mm de largura e 3,5 mm de profundidade apresentado na Fig. 4.2.

Tabela 4.1 – Parâmetros de goivagem para um chanfro com 7 mm de largura e 3,5 mm de espessura

Passes	Angulo de ataque (empurrando)	Distancia bocal-peça (mm)	Velocidade de goivagem (unidades/s)	Corrente (A)
Passe 1	$25^\circ$	8	700	100

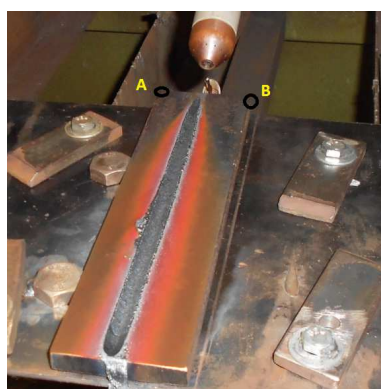


Figura 4.2 – Chanfro feito por plasma

Para se obter uma largura do chanfro desejada, precisou-se fazer mais um passe de goivagem na lateral daquele existente, usando-se os mesmos parâmetros de goivagem como no caso do primeiro passe. Obteve-se um chanfro que no centro da chapa apresentava uma superfície entre os passes de goivagem como o apresentado na Fig. 4.3. Para eliminar essa superfície, decidiu-se fazer mais um passe de goivagem com os mesmos parâmetros e a velocidade de goivagem de 2000 unidades/s.



Figura 4.3 – Esquema do chanfro obtido por goivagem depois dois passes

Depois que foi feito o passe 3, ao se tentar repetir os testes, para se verificar as dimensões, o chanfro apresentava geometrias irregulares como e apresentado aproximadamente na Fig. 4.4.

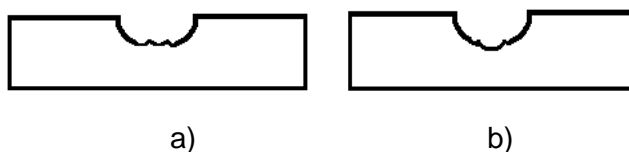


Figura 4.4 – Tipos de geometrias irregulares obtidas durante a goivagem

Os chanfros feitos por plasma apresentaram resultados aceitáveis (Fig. 4.5), com um tempo de execução rápido, só que para fazer as comparações entre as soldas e obter resultados verdadeiros, a geometria do chanfro não poderia influenciar os resultados das medições da geometria do cordão. Os parâmetros de goivagem utilizados estão apresentados em Tab. 4.2.

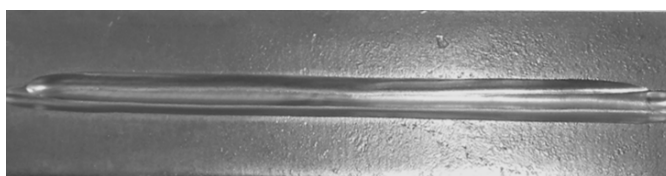


Figura 4.5 - Chapa com um canal realizado por 3 passes de goivagem a plasma, para confecção do chanfro para soldagem de passe único

Tabela 4.2 – Parâmetros de goivagem

<b>Passes</b>	<b>Angulo de ataque (empurrando)</b>	<b>Distância bocal-peça (mm)</b>	<b>Velocidade de goivagem (unidades/s)</b>	<b>Corrente (A)</b>
<b>Passe 1</b>	25 <sup>0</sup>	8	700	100
<b>Passe 2</b>	25 <sup>0</sup>	8	700	100
<b>Passe 3</b>	25 <sup>0</sup>	8	2000	100

Os resultados mostraram que, indiferentemente dos parâmetros usados, não houve condições para se obter um chanfro com as dimensões desejadas de uma só vez, precisando-se efetuar três passes de goivagem para chegar nas dimensões inicial planejadas. Apesar da aparência do chanfro efetuado por goivagem com plasma ter sido aceitável, encontraram-se algumas dificuldades em termos de repetitividade dimensional.

Por isto, procurou-se outra modalidade de fazer os chanfros. Optou-se pela operação de fresagem após a remoção de material por goivagem. Utilizou-se para tal uma fresa de topo com diâmetro de 10 mm. Antes da fresagem, foi feito esmerilhamento para remover o material endurecido da superfície do chanfro, para não prejudicar o bom funcionamento da ferramenta. A execução do chanfro com esta abordagem, como ilustra a Fig. 4.6, ofereceu a vantagem de se obter a repetitividade dimensional e menor tempo de usinagem.



Figura 4.6 - Chapa com canal retificado por fresamento após 3 passes de goivagem a plasma, para confecção do chanfro para soldagem de passe único

Porém, concluiu-se que para a obtenção dos chanfros com goivagem por plasma, esmerilhamento e fresamento gastava-se muito tempo para a preparação de chapas de testes. Por isto, buscou-se encontrar outro método de obtenção dos chanfros, somente por meio da operação de fresagem (Fig. 4.7). Com a regulagem das velocidades de rotação da fresa e do avanço adequados, respectivamente 1500-1800 rpm e 30-50 mm/min, conseguiu-se obter o chanfro com as dimensões desejadas com dois ou três passes de fresagem. O tempo total de obtenção da uma chapa chanfrada foi de aproximadamente 15 min.



Figura 4.7 – Chapa chanfrada por fresagem

Mas, para a soldagem multipasses, precisava-se de uma chapa com a espessura maior, que permitisse efetuar pelo menos 3 a 4 passes de enchimento. Escolheu-se duas barras-chata de aço comum ao carbono de 52 x 200 x 19 mm, que, depois de usinadas também por fresamento (fresa de topo com diâmetro de 22 mm, como ilustra a Fig. 4.9) chanfros de 30° e deixado um nariz de 5 mm, perfizeram uma junta com folga zero, como ilustrado pela Fig. 4.8. Previu-se o nariz do chanfro para analisar a penetração do primeiro passe. Como os experimentos são voltados para o estudo da soldagem de passe de enchimento, não foi feita a soldagem do passe de raiz.



Figura 4.8 – Obtenção de chanfro para soldagem multipasses, realizado com 3 a 4 passes (em função de estado de afiação da fresa), utilizando-se uma velocidade de rotação de 550-600 rpm e com uma velocidade de avanço de 30-40 mm/min

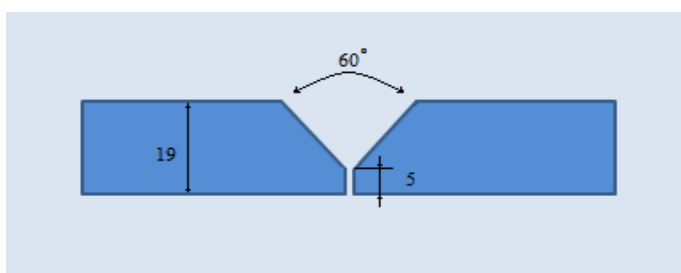


Figura 4.9 – O formato e as dimensões da placa de teste para soldagem de enchimento multi-passes

## 4.2 Avaliação comparativa em MIG/MAG DA P-P e MIG/MAG DA P-CCC em soldagem de passe único na posição plana

### 4.2.1 Soldagem com o processo MIG/MAG DA P-P

Inicialmente foram pesquisados os melhores parâmetros de soldagem para cada arame separadamente. Escolheu-se para o primeiro arame uma corrente de 280 A e para o segundo arame de 180 A, seguindo-se as sugestões dos trabalhos anteriores que foram realizados no LAPROSOLDA e os resultados de alguns trabalhos pesquisados na literatura acadêmica-científica, segundo os quais, para uma estabilidade maior do processo MIG/MAG DA, a corrente do arame líder deve ser de 40 a 60% maior do que do arame seguidor, afirma Scotti e Ponomarev (2008). O valor da corrente média do arame líder foi aproximado ao valor da corrente de transição da combinação arame AWS-ER70S-6 de 1,2 mm de diâmetro e Ar+8%CO<sub>2</sub> como gás de proteção, para se assegurar uma transferência por voo livre. Além disto, este valor de corrente proporcionou a obtenção de um cordão de solda com boa penetração.

Após se estabelecer as correntes médias previstas para cada arame, encontraram-se os outros parâmetros. No caso da soldagem com corrente pulsada, para obtenção de uma transferência de uma gota por pulso, Scotti e Ponomarev (2008) apresentam um monograma para esta combinação arame-gás, em que, para uma corrente de pulso de 350 A, se necessita de um tempo de base de 3,5 ms. A distância bico de contato-peça foi realizada a partir do centro do fundo do chanfro, como mostrado na Fig. 4.10, fixada no valor de 21 mm. Os outros parâmetros, corrente de base e tempo de base, foram escolhidos para se obter a corrente média de 280 A. Da mesma forma, foram escolhidos os parâmetros para arame seguidor.

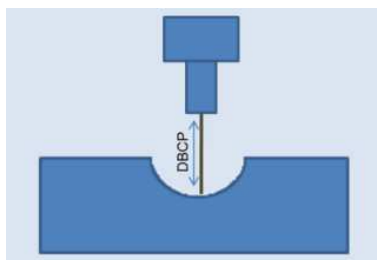


Figura 4.10 – Distância bico de contato-peça utilizado nas soldagens de passe único

Começou-se a soldar colocando-se um valor superior da velocidade de alimentação de arame, para se evitar danificar os bicos de contato por “burn-back” (os bicos de contatos para a tocha duplo arame são bem mais caros em comparação com bicos para uma tocha convencional com um arame). A velocidade de alimentação era, então, reduzida até se obter um arco estável, com aproximadamente 3-4 mm de comprimento. Depois de encontrado os parâmetros separados para cada arame, soldou-se com os dois arames usando-se a tocha Binzel, a qual tem arames paralelos distanciados de 15 mm. Foram ajustados os parâmetros para que os arcos dos dois arames tivessem um tamanho mínimo e uma estabilidade boa, sem ter uma quantidade significativa de respingos.

Uma característica importante na soldagem com MIG/MAG DA, quando se usa a corrente pulsada nos dois arames, é a sincronização. Como os tempos de pico e de base são iguais nos dois arames, calculou-se o valor da defasagem (5,8 ms) para que a corrente de pico do segundo arame começasse a subir durante o tempo da corrente de base do arame líder. Durante as soldagens, observou-se que o sopro magnético entre os eletrodos pode ser diminuído através da utilização de defasagem, mas não pode ser eliminado completamente.

Encontrados todos os parâmetros de soldagem adequados, verificou-se que os valores das correntes adquiridas correspondiam aos valores determinados. Os valores da corrente de pico e corrente de base de cada arame foram ajustados até se obter o valor da corrente média adquirida igual ou próximo da corrente média inicial estabelecida, 280 A para arame líder e 180 A para arame seguidor. A primeira placa de teste foi soldada com uma velocidade de soldagem adequada para encher o chanfro, o que permitiu obter um cordão de solda uniforme e sem falta de enchimento. Conseguiu-se encher o chanfro com uma velocidade de 7 mm/s. Para esta velocidade, usou-se uma velocidade de alimentação de 10,3 m/min em arame líder e 4,4 m/min para o arame seguidor.

Depois do primeiro experimento, aumentou-se a velocidade de soldagem até se encontrar a velocidade de soldagem limite máxima do processo de soldagem MIG/MAG DA Pulsado-Pulsado. Considerou-se para definir a velocidade de soldagem limite máxima a condição na qual o cordão de solda deixava de ser regular e aceitável. Com uma velocidade

de soldagem de 26,4 mm/s, obteve-se bons resultados. O cordão de soldagem ficou bem regular e teve um comportamento bom. Depois que foram feitas soldagens com velocidade de soldagem 44 mm/s e 48,6 mm/s. Os cordões de solda foram de forma aceitáveis. Aumentou-se a velocidade de soldagem até 53,5 mm/s, condição em que a geometria do cordão de solda começou a ficar irregular. Esta velocidade foi considerada como velocidade de soldagem limite máxima para este processo.

Os parâmetros de soldagem relativos aos experimentos para a soldagem no modo Pulsado-Pulsado nas 5 diferentes velocidades de soldagem acima citadas são apresentados na Tab. 4.3, enquanto a Tab. 4.4 apresenta os valores de corrente e tensão monitorados durante as soldagens. Oscilogramas de corrente e tensão típicos dessa condição de soldagem está mostrada na Fig. 4.11, demonstrando a característica do processo MIG/MAG DA P-P.

Tabela 4.3 – Parâmetros de soldagem regulados para soldagem de passe de enchimento único com o MIG/MAG DA P-P

Arame 1						Arame 2				
$V_s$ (mm/s)	$I_{p1}$ (A)	$t_{b1}$ (ms)	$I_{b1}$ (A)	$t_{b1}$ (ms)	$V_{a1}$ (m/min)	$I_{p2}$ (A)	$t_{p2}$ (ms)	$I_{b2}$ (A)	$t_{b2}$ (ms)	$V_{a2}$ (m/min)
7; 26,4; 44; 48,6; 53,5	366	3,5	255	8	10,3	360	3,5	106	8	4,4

Tabela 4.4 – Parâmetros de soldagem monitorados para soldagem de passe de enchimento único com o MIG/MAG DA P-P

$V_s$ (mm/s)	$V_{s \text{ real}}$ (mm/s)	Arame	$V_{a \text{ real}}$ (m/min)	$I_m$ (A)	$I_{rms}$ (A)	$U_m$ (V)	$U_{rms}$ (V)
7	7,2	Arame 1	9,7	282,9	287,4	27,9	28,2
		Arame2	4,6	174,3	207,5	22,5	23,2
26,4	25,5	Arame 1	9,7	282,3	285,9	26,8	27
		Arame2	4,6	173,3	207,6	20	22,9
44	42	Arame 1	9,7	282	286,3	25,7	25,6
		Arame2	4,6	174,2	206,1	22,8	23,6
48,6	46,4	Arame1	9,7	284,9	288,9	25,5	25,9
		Arame2	4,6	179,1	213,2	21,7	22,5
53,5	51	Arame1	9,7	281,9	286,3	26,4	26,5
		Arame2	4,6	165,8	200,3	26,5	25,2



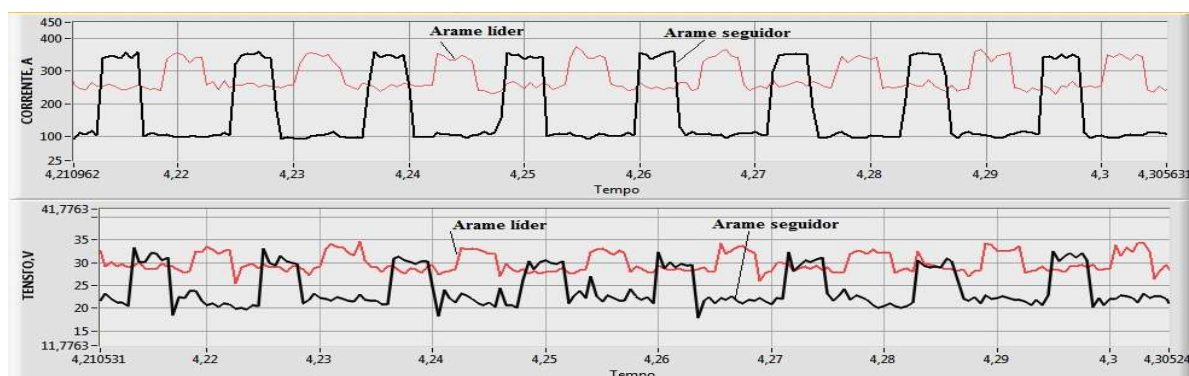


Figura 4.11 – Oscilograma típico de corrente e tensão para a soldagem com os parâmetros da Tab. 4.1 (MIG/MAG DA P-P)

A Tab. 4.5, por seu lado, ilustra os cordões resultantes de todos estes experimentos. Como se pode observar, o cordão de solda executado com velocidade de soldagem de 7 mm/s tem uma boa aparência e inseto de discontinuidades. Os demais cordões apresentam piora crescente do acabamento superficial, mas ainda garantindo falta de discontinuidades.

Tabela 4.5 – Aspecto visual dos cordões de soldas das soldagens de passe único e as respectivas seções transversais com processo P-P

$V_s$ (mm/s)	Vista da superfície do cordão	Seção transversal
7		
26,4		
44		
48,6		Não verificado
53,5		Não verificado

As seções transversais dos cordões de soldas apresentam uma penetração boa e suficiente, tanto no fundo quanto na lateral do cordão. Pode-se observar que o cordão de solda não apresenta falta de fusão em nenhum dos casos, seja a velocidade de soldagem baixa ou alta. A macrografia dos cordões de soldas foi feita só para as soldas que não apresentaram descontinuidades e qual foram consideradas aceitáveis.

#### 4.2.2 Soldagem com processo MIG/MAG DA P-CCC

O modo operacional CCC pode ser caracterizado como de alta estabilidade de arco, pouca geração de respingos e uma aparência boa do cordão de solda. Assim, no caso da combinação dos modos operacionais P-CCC, os parâmetros utilizados para o arame líder foram os mesmos da soldagem com P-P, mas para o arame seguidor, no qual se utilizou o Curto-Circuito Controlado, precisavam-se encontrar os parâmetros adequados para soldagem. Porém, ao contrário do modo pulsado, o número total dos parâmetros que precisam ser regulados chegam a 16, como ilustrado pela Fig. 4.12.

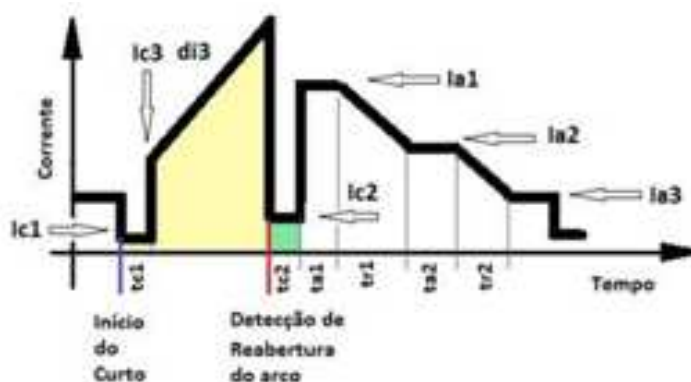


Figura 4.12 - Onda do modo operacional CCC, onde: **Ia1** - corrente de pico de arco; **Ia2** - corrente para aumento da taxa de fusão; **ta1** - tempo da corrente Ia1; **ta2** - tempo da corrente Ia2; **Ia3** - corrente de manutenção do arco; **di3** - taxa de variação de subida da corrente durante 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 de assentamento da gota; **tc2** - tempo de espera de reabertura; **Ic1** - corrente de assentamento de gota; **Ic2** - corrente de rompimento da ponte metálica

Para o cálculo da corrente média do formato de onda do processo CCC, foi desenvolvido um equacionamento em planilha Excel (Fig. 4.13). O valor da corrente média calculada não foi igual ao valor da corrente adquirida, mas a formulação, junto com as

indicações do orientador, serviu como um apoio para encontrar os parâmetros desejados. Depois de determinado o valor da corrente média do arame seguidor, da mesma forma como no caso do Pulsado-Pulsado, soldou-se com os dois arames. Com os ajustes necessários, chegou-se nas condições desejadas. As Tab. 4.6 e 4.7 apresentam os parâmetros de regulagem e monitorados aplicados nos experimentos, enquanto a Fig. 4.14 apresenta oscilogramas de corrente e tensão típicos dessa condição de soldagem, demonstrando a característica do processo MIG/MAG DA P-CCC. Observou-se visualmente que o arco do arame-seguidor, onde foi utilizado o CCC, é menor do que no caso da soldagem com Pulsado-Pulsado, sugerindo uma estabilidade superior do processo. Mas o mais importante foi que, para se atingir a mesma corrente média no arame seguidor, a velocidade de alimentação do arame foi um pouco maior com CCC do que com Pulsado (5,2 (5,0 real) contra 4,4 (4,6 real) m/min).

Curto									
lc1	95	lc3	224	Ipic	350	lc2	105	ImCurto	200,4839
tc1	0,5	Tc3	1,5	Tpic	0,5	tc2	0,6	T Curto	3,1
Arco									
la1	290	ltr1	290	ltr12	190	la2	190	la2tr21	190
ta1	2	tr11	0,3	tr12	0,3	ta2	3	tr21	0,3
								tr21	0,3
								ta3	2
								Im Arco	204,0244
								T Arco	8,2

Figura 4.13 – A interface do equacionamento para o cálculo da corrente média para o modo CCC

Tabela 4.6 - Parâmetros de soldagem regulados para soldagem de passe de enchimento único com o MIG/MAG DA P-CCC

Arame 1							
V <sub>s</sub> (mm/s)	I <sub>p1</sub> (A)	t <sub>b1</sub> (ms)	I <sub>b1</sub> (A)	t <sub>b1</sub> (ms)	V <sub>a1</sub> (m/min)		
7,2; 27,2; 45,3; 50; 55	350	3,5	250	8	10,3		
Arame 2							
I <sub>a1</sub> (A)	t <sub>a1</sub> (ms)	I <sub>a2</sub> (A)	t <sub>a2</sub> (ms)	V <sub>a</sub> (m/min)	I <sub>c1</sub> (A)	t <sub>c1</sub> (ms)	I <sub>c2</sub> (A)
290	2	190	3	5,3	95	0,5	105
t <sub>c2</sub> (ms)	I <sub>c3</sub> (A)	di3 (A/s)	U <sub>cc</sub> (V)	kr	tr <sub>1</sub> (ms)	tr <sub>2</sub> (ms)	I <sub>a3</sub> (A)
0,6	214	120	10	1,8	0,6	0,6	140

Tabela 4.7 - Parâmetros de soldagem monitorados para soldagem de passe de enchimento único com o MIG/MAG DA P-CCC

$V_s$ regulada (mm/s)	$V_s$ real (mm/s)	Arame	$V_a$ real (m/min)	$I_m$ (A)	$I_{rms}$ (A)	$U_m$ (V)	$U_{rms}$ (V)
7,2	7,4	Arame 1	9,7	283,2	288,1	26,7	27
		Arame 2	5,0	173,4	185,2	19,4	21,2
27,2	26,2	Arame 1	9,7	281,4	285,9	29,3	29,5
		Arame 2	5,0	176,2	187,2	19,1	20,3
45,3	43,3	Arame 1	9,7	282,7	287,2	26,4	26,6
		Arame 2	5,0	175,9	186,9	18,9	20,2
50,0	47,7	Arame 1	9,7	282,2	286,7	27,5	27,7
		Arame 2	5,0	169,5	180,8	18,4	19,8
55,0	61,9	Arame 1	9,7	284,6	289,8	27,1	27,6
		Arame 2	5,0	166,1	181,1	20,8	24,1

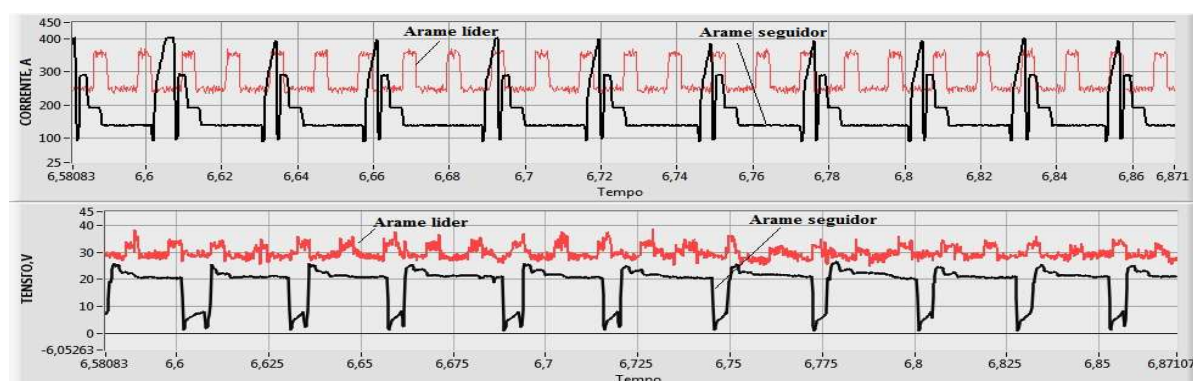
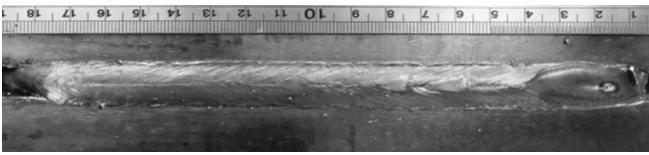
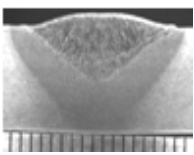
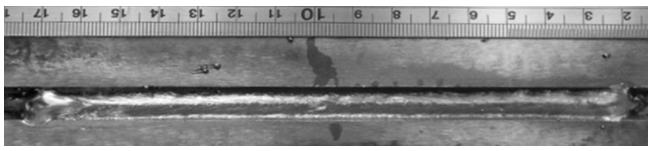
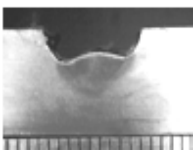
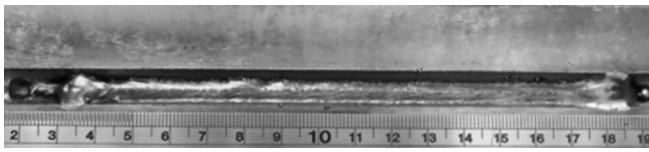
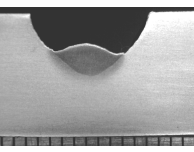
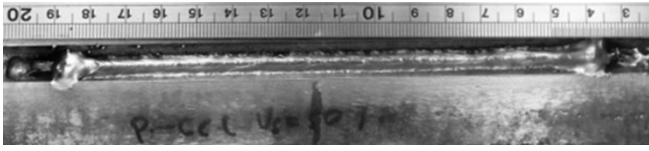
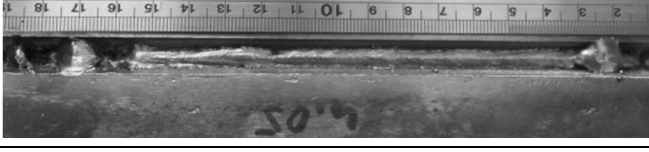


Figura 4.14 – Oscilograma típico de corrente e tensão para a soldagem com os parâmetros da Tab. 4.7 (MIG/MAG CA P-CCC)

Para efeito comparativo com o processo MIG/MAG DA P-P, foram repetidas as soldas feitas agora com MIG/MAG DA P-CCC. A velocidade de soldagem foi calculada e ajustada para manter o mesmo volume de solda. Os resultados desses cálculos estão apresentados no Apêndice IV. Quando se soldou com a velocidade máxima limite do processo P-P (53,5 mm/s), calculada para o mesmo volume para o processo P-CCC como 55 mm/s, o comportamento do processo e a formato da solda também apresentaram resultados inaceitáveis. Esta velocidade foi considerada como a velocidade máxima limite.

Todas as soldas apresentaram uma aparência aceitável, tanto para a velocidade inferior quanto para a velocidade superior. As seções transversais dos cordões de solda não apresentam falta de fusão e oferecem uma penetração boa. As fotos dos cordões de soldas são apresentadas na Tab. 4.8.

Tabela 4.8 – Aspecto visual dos cordões de soldas das soldagens de passe único e as respectivas seções transversais com processo P-CCC

$V_s$ (mm/s)	Vista da superfície do cordão	Seção transversal
7,2		
27,2		
45,3		
50		Não verificado
55		Não verificado

#### 4.2.3 Discussão e comparação dos resultados na soldagem do passe de enchimento

##### a) Aspecto visual dos cordões de solda

Analisando-se os cordões de soldas, pode-se afirmar que todas as soldas feitas com ambos os processos são aceitáveis. O processo P-P apresenta uma quantidade maior de respingos, mas não considerável. No caso do P-CCC, o cordão de solda ficou um pouco mais convexo, o que ocorre devido ao tamanho do arco; no caso do CCC, o arco é visualmente menor em comparação com o P, confirmado pelos maiores valores de tensão do P. O cordão de solda feito com P-P em velocidade baixa apresenta algumas ondas na superfície do cordão, quando no caso do P-CCC o cordão fica mais liso. Isto pode acontecer em virtude da pressão do arco, que no caso do P, é maior.

### b) Envelope operacional

Uma das tarefas dos testes foi identificar as velocidades limites de soldagem para cada processo trabalhando com aproximadamente as mesmas correntes médias. Os gráficos das velocidades de soldagem identificadas como velocidades limites são apresentados na Fig. 4.15. Também, nesta figura, está apresentada a faixa de material depositado para cada processo dentro de cada envelope operacional. O cálculo do material depositado será apresentado em Apêndice V. Pode-se observar na figura que ambos os processos apresentam aproximadamente o mesmo envelope de operação. Em relação ao material depositado os resultados da mesma forma são aproximadamente iguais.

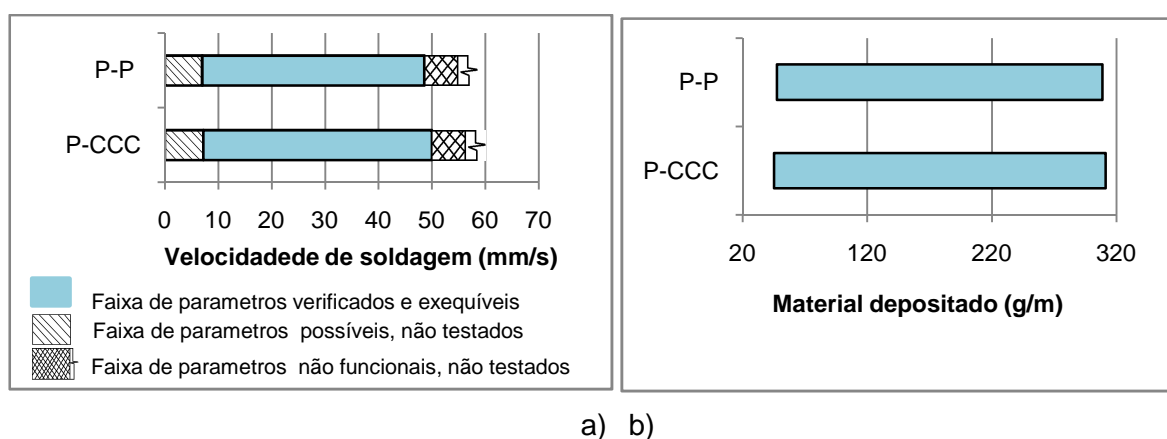


Figura 4.15 – Representação do envelope operacional; a) velocidades de soldagem limites; b) quantidade de material depositado por unidade de comprimento que corresponde os valores limite das faixas operacionais

### c) Análise da geometria dos cordões de soldas

A avaliação quanto a geometria dos cordões obtidos com os dois processos de soldagem foi feita para os cordões de soldas com o mesmo volume depositado. No caso, a solda feita com P-P a uma velocidade de soldagem de 7 mm/s foi comparada com a solda do P-CCC com velocidade de soldagem 7,2 mm/s, o com 26,4 mm/s com o de 27,2 mm/s e o com 44 mm/s com o de 45,3 mm/s. Apêndice VI apresenta todos os resultados das medições da geometria dos cordões de soldas.

Na Fig. 4.16 são apresentadas as áreas fundidas dos cordões de solda para as condições acima definidas, ou seja, para em uma mesma corrente média se obter o mesmo volume de material depositado por unidade de comprimento de solda (mesma área depositada). Como se pode perceber, as velocidades de soldagem para P-CCC é ligeiramente maior, em média 3% maior. Esta característica em si só indica uma leve tendência de produtividade ao P-CCC se for levado em conta apenas o tempo de soldagem

para se fazer o mesmo cordão (menor tempo de soldagem, menor custo de mão de obra e de consumo de gás, etc.). Porém, como se pode observar, o processo de soldagem P-P apresenta uma área total do cordão maior (em valores absolutos as diferenças se tornam progressivamente menores para maiores velocidades de soldagem). A maior área total com P-P se deve ao fato de que, devido à menor velocidade de soldagem, a chapa recebe mais calor e a energia de soldagem é maior. Outra razão por que a chapa recebe mais calor seria o volume do arco, que no caso do arame seguidor o P tem-se um arco maior do que no caso do CCC (maior transferência de calor para a chapa). Um maior volume de cordão como geometrias similares pode ser um indício de maiores tensões térmicas.

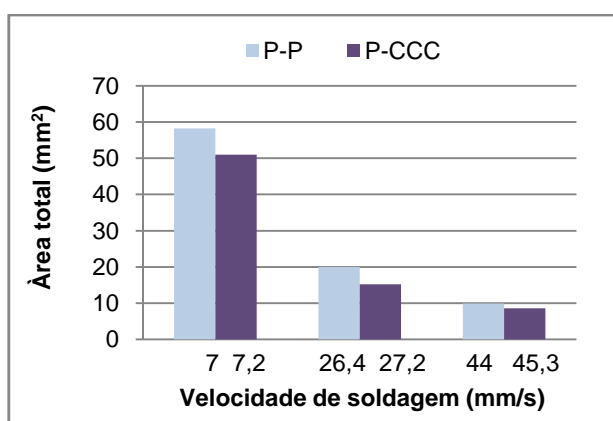


Figura 4.16 – Comparação entre as áreas totais de cordões feitos pelos processos P-P e P-CCC a uma mesma corrente média e mesma área adicionada

#### d) Área fundida

Efetuada o cálculo da área fundida, pode-se observar que o processo P-P apresenta uma área fundida maior (Fig. 4.17).

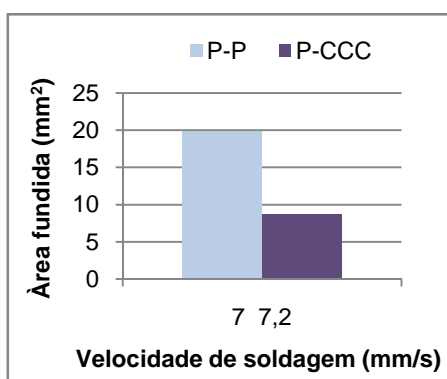


Figura 4.17 – Cálculo da área fundida



A área fundida foi calculada com a diferença entre a área transversal e a área do chanfro menos área do reforço. Essa área foi calculada só para a velocidade de soldagem na qual o chanfro foi completamente preenchido (7 mm/s para P-P e 7,2 mm/s para P-CCC).

Já na Fig. 4.18, são apresentadas as áreas das ZACs dos cordões de solda também para as condições de uma mesma corrente média e mesmo volume de material depositado por unidade de comprimento de solda (mesma área depositada). Da mesma forma, o processo de soldagem P-P apresenta uma ZAC maior, principalmente em baixas velocidades de soldagem (maior energia), quando as restrições ao fluxo de calor pela geometria da chapa se tornam mais críticas.

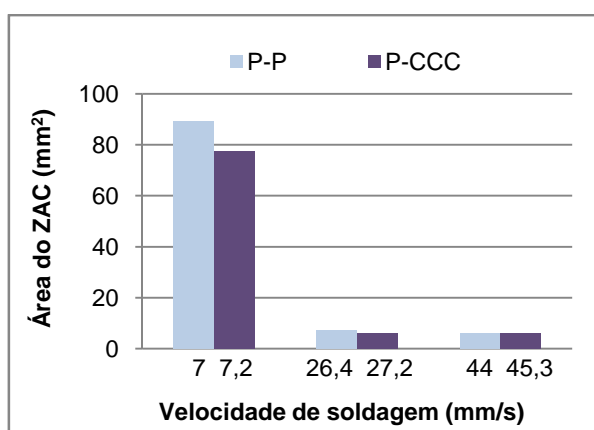


Figura 4.18 – Áreas das ZACs dos cordões de solda

Mas a área fundida por si não reflete a configuração geométrica do cordão, assim como a justificativa para diferenças. Por isto, torna-se também importante as medições da penetração, largura e reforço dos cordões de solda, como ilustra Fig. 4.19. As medições mostram que no caso da soldagem com processo P-P obteve-se uma penetração maior. Este fato era esperado, uma vez que, o P-P em comparação com o P-CCC, além da maior energia de soldagem, tem o efeito da transferência das gotas (momentum) do arame seguidor. Outro fator que influencia a penetração é o jato de plasma do arame seguidor, que permite abrir e empurrar poça metálica e transferir mais calor para dentro da chapa, resultando uma penetração maior. Ao se comparar as correntes  $I_{rms}$  nos arames seguidores, pôde-se observar que a corrente  $I_{rms}$  do processo pulsado é maior em aproximadamente 20 A. Esta diferença também pode influenciar sobre o tamanho da penetração.



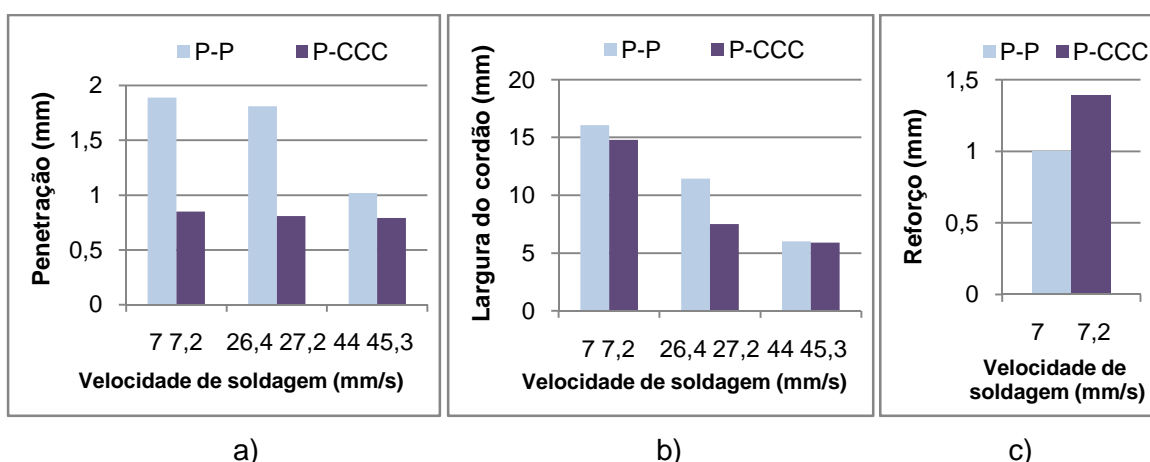


Figura 4.19 - Representação das medições da penetração (a), largura (b) e reforço (c)

No caso das convexidades, observou-se que o cordão com o P-CCC tem o reforço maior e a largura menor (mais convexo). Essa situação era esperada, baseado no fato de que em MIG/MAG DA seria o arame seguidor que governa o acabamento do cordão e do modo CCC se espera um menor comprimento de arco, além de não ficar 100% com arco aceso (reduz a molhabilidade).

#### e) Avaliação econômica

Os fatores que mais influenciam o custo final de uma operação de soldagem são os custos do arame e do gás de proteção e o tempo de execução.

As diferenças entre as velocidades de soldagem não são muito consideráveis na soldagem com os dois processos, pode-se dizer que os consumos de gás e arame são aproximadamente iguais.

Os cálculos sobre a eficiência dos processos mostram que o processo P-CCC tem uma porcentagem de respingos menor, aproximadamente uma média de 8% em comparação com P-P 13% (Fig. 4.20). Pode-se afirmar, pois, que no caso do P-CCC a operação de limpeza dos respingos seria minimizada, o quê também pode ter influência sobre o cálculo econômico. A tabela com os dados para o cálculo da porcentagem dos respingos está apresentada no Apêndice VII.

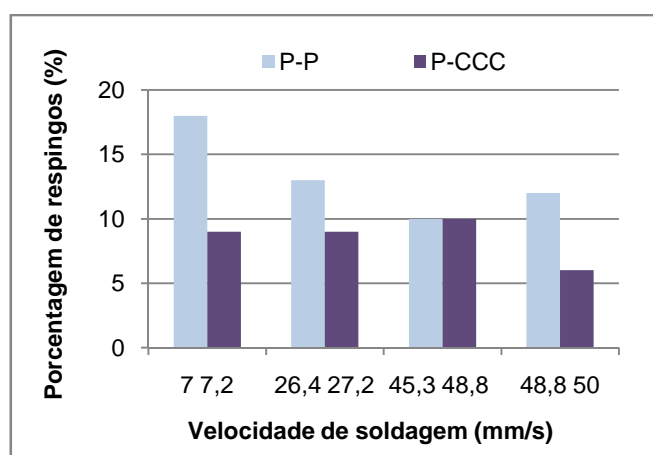


Figura 4.20 – Geração de respingos para diferentes velocidades de soldagem durante os testes comparativos com os processos P-P e P-CCC

Outro aspecto que merece destaque, apesar de não tanto significativo, é o valor da tensão do segundo arco. O processo CCC tem uma tensão menor que leva a um consumo de energia menor. Em final, os resultados apresentam que o P-CCC é um processo mais econômico do que o processo P-P.

#### 4.3 Avaliação comparativa entre MIG/MAG DA P-P e MIG/MAG DA P-CCC em soldagem multipasses na posição plana

A idéia principal da realização dos testes para soldagem multipasses foi de analisar comparativamente o comportamento dos processos de soldagem MIG/MAG DA P-P e P-CCC em relação à formação de discontinuidades típicas entre passes, como falta de fusão entre os passes, além de avaliar a repetitividade do comportamento do processo. Assim, para as soldagens multipasses, usou-se os mesmos parâmetros de soldagem usados na soldagem de um único passe para a condição de enchimento do chanfro, para soldagem dos todos os passes. A distância bico de contato-peça foi regulada para um comprimento de 21 mm e os arames-eletrodos foram colocados no centro do chanfro para soldagem do primeiro passe de solda (Fig. 4.21).

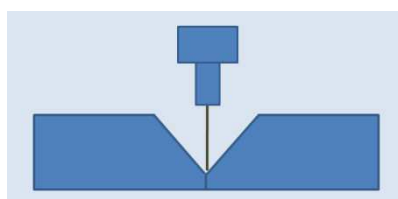


Figura 4.21 – Posicionamento dos arames-eletrodos para soldagem do primeiro passe

Para os passes seguintes, o alinhamento dos arames foi deslocado cerca de 4,5 mm para direita ou esquerda, conforme o caso, para depositar 4 cordões na ordem mostrada na Fig. 4.22.

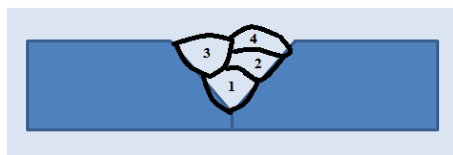


Figura 4.22 – A ordem de soldagem

Ao final de cada passe, a chapa foi deixada resfriar a temperatura do meio ambiente e limpada com escova de aço, para retirar respingos e a escória da superfície do cordão, para não prejudicar a deposição do próximo cordão de solda. As operações de resfriamento e limpeza da chapa junto com a pesagem da chapa foram repetidas depois da soldagem de cada passe.

#### 4.3.1 Soldagem com processo MIG/MAG DA P-P

A Tab. 4.9 apresenta a parametrização para a soldagem pelo processo MIG/MAG DA P-P, enquanto a Tab. 4.10 apresenta os parâmetros monitorados durante a soldagem. Oscilogramas típicos de corrente e tensão para soldagem multipasses com processo MIG/MAG DA P-P estão apresentados na Fig. 4.23.

Tabela 4.9 – Parâmetros de soldagem regulados para soldagem multipasses com processo MIG/MAG DA P-P

Arame 1						Arame 2				
$V_s$ (mm/s)	$I_{p1}$ (A)	$t_{b1}$ (ms)	$I_{b1}$ (A)	$t_{b1}$ (ms)	$V_{a1}$ (m/min)	$I_{p2}$ (A)	$t_{p2}$ (ms)	$I_{b2}$ (A)	$t_{b2}$ (ms)	$V_{a2}$ (m/min)
7	366	3,5	255	8	10,3	360	3,5	106	8	4,4

Tabela 4.10 – Parâmetros de soldagem monitorados para soldagem multipasses com o MIG/MAG DA P-P

$V_s$ (mm/s)	$V_{s \text{ real}}$ (mm/s)	Nr. Passes	Arame	$V_{a \text{ real}}$ (m/min)	$I_m$ (A)	$I_{rms}$ (A)	$U_m$ (V)	$U_{rms}$ (V)
7	7,2	Passe 1	Arame 1	9,7	286,8	290,6	26,5	26,7
			Arame 2	4,6	179,1	207,9	22,8	23,3
		Passe 2	Arame 1	9,7	282	288,1	26,7	26,9
			Arame 2	4,6	176,9	205,6	23,7	24,2
		Passe 3	Arame 1	9,7	279,6	286,4	25,6	25,8
			Arame 2	4,6	180,6	211,7	21,2	21,9
		Passe1	Arame 1	9,7	280,8	284,5	26,2	26,4
			Arame 2	4,6	175,4	207,2	23,7	24,9

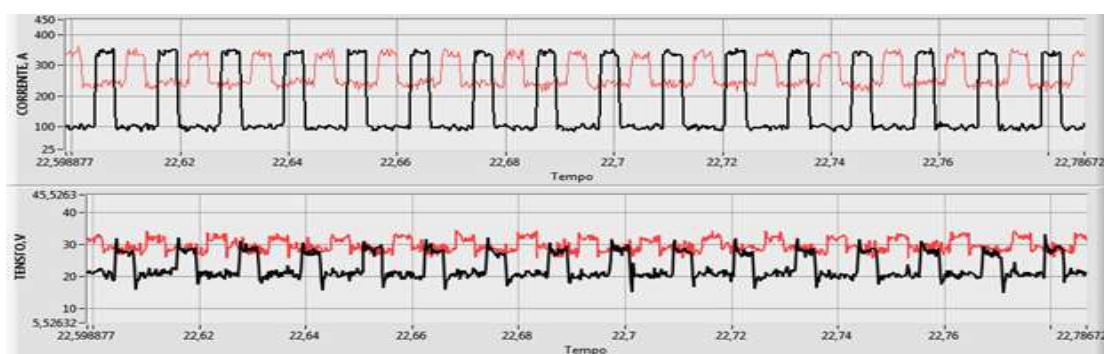


Figura 4.23 - Oscilograma típico de corrente e tensão para a soldagem multipasses com os parâmetros da Tab. 4.10 (MIG/MAG DA P-P)

O aspecto visual e a seção transversal da chapa soldada estão apresentados na Tab. 4.11. Analisando-se essa tabela, pode-se dizer que o cordão de solda está livre de quaisquer discontinuidades e apresenta uma boa penetração, tanto na lateral quanto no fundo do cordão, assegurando uma boa penetração entre os passes.

Tabela 4.11 - Aspecto visual do cordão de solda da soldagem multipasses e a respectiva seção transversal para soldagem com processo MIG/MAG DA P-P

$V_s$ (mm/s)	Vista da superfície do cordão	Seção transversal
7		

#### 4.3.2 Soldagem multipasses na posição plana com processo MIG/MAG DA P-CCC

Os parâmetros regulados nas fontes de soldagem para efetuar os cordões de soldas com o MIG/MAG DA P-CCC estão apresentados na Tab. 4.12. No caso da soldagem com MIG/MAG DA P-CCC, a velocidade de soldagem calculada foi de 7,2 mm/s para manter o mesmo volume do caso da soldagem com o processo MIG/MAG DA P-P. Já os parâmetros de soldagem monitorados durante a soldagem estão apresentados em Tab. 4.13. Os oscilogramas típicos de corrente e tensão para soldagem multipasses com o processo MIG/MAG DA P-CCC estão apresentados na Fig. 4.24.

Tabela 4.12 – Parâmetros de soldagem regulados para soldagem multipasses com processo MIG/MAG DA P-CCC

Arame 1							
V <sub>s</sub> (mm/s)	I <sub>p1</sub> (A)	t <sub>b1</sub> (ms)	I <sub>b1</sub> (A)	t <sub>b1</sub> (ms)	V <sub>a1</sub> (m/min)		
7,2	366	3,5	255	8	10,3		
Arame 2							
I <sub>a1</sub> (A)	t <sub>a1</sub> (ms)	I <sub>a2</sub> (A)	t <sub>a2</sub> (ms)	V <sub>a</sub> (m/min)	I <sub>c1</sub> (A)	t <sub>c1</sub> (ms)	I <sub>c2</sub> (A)
290	2	190	3	5,3	95	0,5	105
t <sub>c2</sub> (ms)	I <sub>c3</sub> (A)	di3 (A/s)	U <sub>cc</sub> (V)	kr	tr <sub>1</sub> (ms)	tr <sub>2</sub> (ms)	I <sub>a3</sub> (A)
0,6	214	120	10	1,8	0,6	0,6	140

Tabela 4.13 – Parâmetros de soldagem monitorados para soldagem multipasses com processo MIG/MAG DA P-CCC

$V_s$ (mm/s)	$V_{s \text{ real}}$ (mm/s)	Nr. passes	Arame	$V_{a \text{ real}}$ (m/min)	$I_m$ (A)	$I_{rms}$ (A)	$U_m$ (V)	$U_{rms}$ (V)
7,2	7,4	Passe 1	Arame 1	9,7	286,9	291,6	25,3	25,9
			Arame 2	5	180,5	193,9	18,2	20,1
		Passe 2	Arame 1	9,7	281,2	285,6	29	29,1
			Arame 2	5	176,7	185,3	19	20,1
		Passe 3	Arame 1	9,7	285,4	290,3	26,7	27,1
			Arame 2	5	179,1	190,7	19,3	20,7
		passe 4	Arame 1	9,7	283	287,5	28,4	28,6
			Arame 2	5	175,9	187,8	19,3	20,9

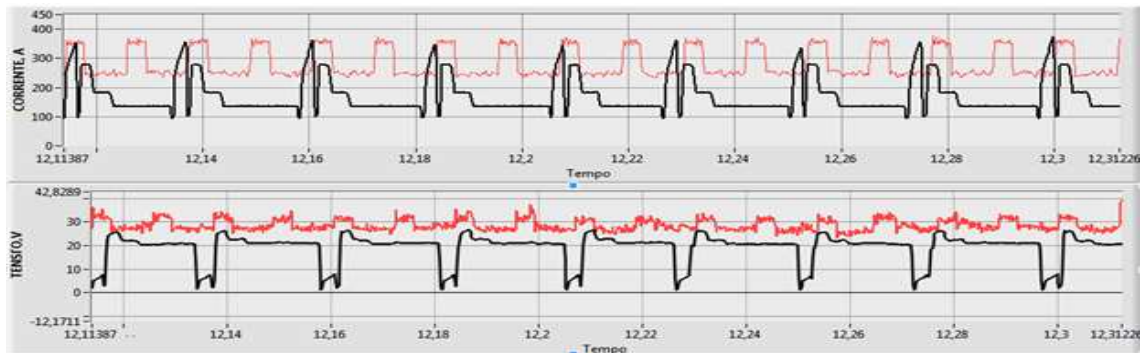


Figura 4.24 - Oscilograma típico de corrente e tensão para a soldagem multipasses com os parâmetros da Tabela 4.13 (MIG/MAG DA P-CCC)

O aspecto visual da chapa soldada e a respectiva seção transversal estão apresentados na Tab. 4.14. Analisando-se a seção transversal do cordão, pode-se dizer que o cordão de solda está livre de quaisquer defeitos e apresenta uma boa penetração, tanto na lateral quanto no fundo do cordão, assegurando uma boa penetração entre os passes. Neste caso, o primeiro passe de solda apresentou uma pequena falta de fusão, mas sem consequência, já que para passe de enchimento não havia a formação de V como na presente placa de teste.

Tabela 4.14 - Aspecto visual da chapa soldada e a respectiva seção transversal para soldagem com MIG/MAG DA P-CCC

$V_s$ (mm/s)	Vista da superfície do cordão	Seção transversal
7,2		

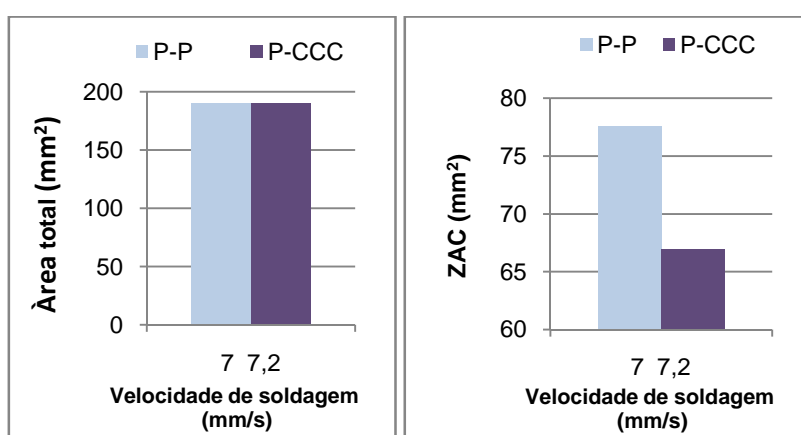
#### 4.3.3 Discussão e comparação dos resultados na soldagem multipasses

##### a) Aspecto visual da chapa soldada

Com os dois processos se obteve soldas aceitáveis, com uma leve tendência de mais respingos no caso do MIG/MAG DA P-CCC. Como no caso da soldagem de um único passe de enchimento, com o P-P o cordão apresenta menor convexidade.

b) *Análise da geometria dos cordões de solda*

Como pode-se observar na Fig. 4.25, não se percebe mais a diferença entre áreas totais entre os processos (como observou-se em passe único) quando se compara as áreas totais das somatórias dos cordões. Este fato é razoável, pois se fez fusão não só do metal de base, mas também sobre cordões pré-depositados. Por outro lado, observa-se que as dimensões da zona afetada pelo calor com o processo P-P foi maior (do que se prevê menores velocidades de resfriamento), em concordância com o observado em passe único.



a) b)

Figura 4.25 – Resultados das medições das seções transversais na soldagem multipasses:  
a) área total do cordão, b) área da zona influenciada pelo calor

c) *Avaliação econômica*

Como para soldagem multipasses foram usados os mesmos parâmetros de soldagem da soldagem de um único passe de enchimento, era de esperar que os resultados fossem aproximadamente iguais. A velocidade de soldagem foi um pouco mais alta no caso do P-CCC, o que faz indicar que o processo é um pouco mais rápido e, ao mesmo tempo um pouco mais econômico.

De mesma forma que nas soldagens de passe único, a Fig. 4.26 mostra que o modo P-P gera com 2% mais de respingos do que o P-CCC. Os resultados do cálculo da quantidade de respingos estão apresentados em Apêndice VII.

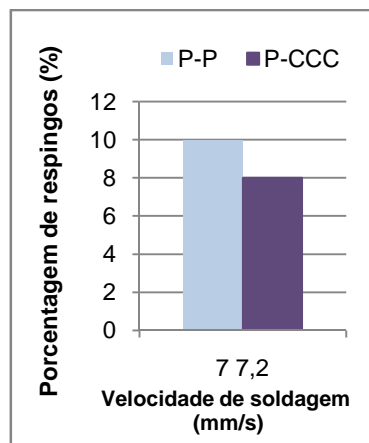


Figura 4.26 – Geração de respingos durante os testes comparativos com os processos P-P e P-CCC em soldagem multipasses



## CAPÍTULO V

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

#### 5.1 Preparação das placas de teste e posicionamento da tocha

As placas de teste foram feitas de barras-chata de aço carbono ABNT 1020 com espessura de 3,2 mm (largura = 52 mm e comprimento = 200 mm). As chapas foram colocadas em posição sobrepostas sem abertura, conforme se demonstra na Fig. 5.1.



Figura 5.1 – Posicionamento das chapas de testes e da tocha de soldagem

A tocha de soldagem utilizada foi posicionada para formar um ângulo de trabalho de 45° com a superfície da chapa de baixo, sem ângulo de ataque (arames-eletrodos de forma sequencial e perpendiculares em relação ao comprimento longitudinal da placa de teste) e com uma distância de 10 mm entre os arames. A distância bico de contato-peça (DBCP) foi fixada em 21 mm.

#### 5.2 Soldagem de chapas finas em junta sobreposta na posição plana com processo MIG/MAG DA P-P

Da mesma forma como nos testes anteriores, foram realizados testes preliminares para se encontrar os parâmetros de soldagem. Como nas situações anteriores, procurou-se manter as mesmas correntes médias almejadas de soldagem, 280 A no arame líder e 180 A no arame seguidor.

Tendo em vista a espessura das chapas e os altos valores das correntes de soldagem, para não se perfurar as chapas ou para se evitar obter um cordão de solda com um volume excessivo para soldagem de chapas finas, começou-se a soldar com uma velocidade de

soldagem de 30 mm/s, obtendo-se uma solda com volume e acabamento aceitável. Essa velocidade foi considerada como velocidade mínima de soldagem.

Os parâmetros regulados para soldagem estão demonstrados na Tab. 5.1 e os parâmetros monitorados na Tab. 5.2. Um oscilograma típico de tensão e corrente estão apresentadas na Fig. 5.2.

Tabela 5.1 - Parâmetros de soldagem regulados para soldagem de chapas finas na posição plana com o MIG/MAG DA P-P

Arame 1							Arame 2					
V <sub>s</sub> (mm/s)	I <sub>p1</sub> (A)	t <sub>b1</sub> (ms)	I <sub>b1</sub> (A)	t <sub>b1</sub> (ms)	I <sub>m1</sub> (A)	V <sub>a1</sub> (m/min)	I <sub>p2</sub> (A)	t <sub>p2</sub> (ms)	I <sub>b2</sub> (A)	t <sub>b2</sub> (ms)	I <sub>m2</sub> (A)	V <sub>a2</sub> (m/min)
30; 40; 50; 60; 65; 70	350	3,5	250	8	280	9,2	350	3,5	100	8	176	6,7

Tabela 5.2 – Parâmetros de soldagem monitorados para soldagem de chapas finas na posição plana como MIG/MAG DA P-P

$V_s$ (m/min)	$V_{s \text{ real}}$ (mm/s)	Arame	$V_{a \text{ real}}$ (m/min)	$I_m$ (A)	$I_{rms}$ (A)	$U_m$ (V)	$U_{rms}$ (V)
30	28,8	Arame 1	9,7	285,1	288,9	29,0	29,8
		Arame 2	6,3	179,8	212,0	26,0	26,9
40	38,2	Arame 1	9,7	282,0	285,5	28,5	28,7
		Arame 2	6,3	176,5	207,3	25,0	25,6
50	47,7	Arame 1	9,7	283,1	282,6	28,0	28,3
		Arame 2	6,3	181,1	212,1	25,6	26,3
60	57,1	Arame 1	9,7	281,8	282,2	28,8	28,9
		Arame 2	6,3	177,1	208,8	26,3	27,0
65	61,8	Arame 1	9,7	276,6	283,0	28,7	29,1
		Arame 2	6,3	180,1	211,6	25,6	26,3
70	66,5	Arame 1	9,7	280,8	284,2	29,3	29,0
		Arame 2	6,3	178,5	209,4	25,4	26,1

O critério para se determinar a velocidade de soldagem máxima limite foi estabelecido pela aparência visual do cordão de solda. Assim, repetiu-se a soldagem, aumentando-se a velocidade de soldagem de 10 em 10 mm/s, até atingir a velocidade de soldagem de 70 mm/s, condição na qual o cordão de solda deixou de ser aceitável. Nessa velocidade, o cordão tornou-se descontínuo e apresentou uma leve tendência de formação da mordedura. Diminuiu-se a velocidade de soldagem para 65 mm/s e obteve-se um cordão de solda

aceitável. Essa velocidade de soldagem foi considerada como limite máximo para as dadas condições paramétricas.

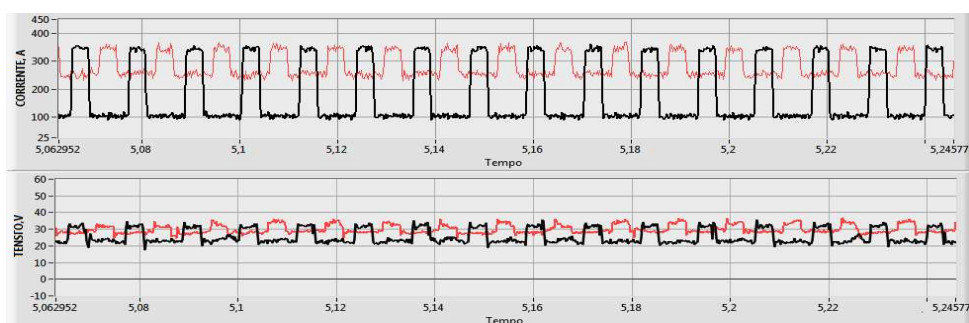


Figura 5.2 – Oscilogramas típicos de corrente e tensão para a soldagem com os parâmetros da Tab. 5.1 (MIG/MAG DA P-P)

Todos os cordões de soldas apresentados na Tab. 5.3, com exceção da solda feita com velocidade de soldagem 70 mm/s, apresentaram um cordão de solda regular e com um aspecto superficial aceitável. Analisando-se as seções transversais desses cordões de soldas, pôde-se observar que tanto as soldas feitas com velocidade baixa quanto às soldas feitas com velocidade alta apresentavam penetração suficiente em ambas as chapas. A macrografia dos cordões de soldas foi feita só para as soldas que não apresentaram descontinuidades e qual foram consideradas aceitáveis.

Tabela 5.3 - Aspecto visual dos cordões de soldas das soldagens de chapa fina e as respectivas seções transversais (MIG/MAG DA P-P)

Vs (mm/s)	Vista da superfície do cordão	Seção transversal
30		
40		
50		
60		
65		
70		Não verificado



Tabela 5.5 - Parâmetros de soldagem monitorados para soldagem de chapa fina com o processo MIG/MAG DA P-CCC

$V_{sreg}$ (m/min)	$V_{s real}$ (mm/s)	Arame	$V_a real$ (m/min)	$I_m$ (A)	$I_{rms}$ (A)	$U_m$ (V)	$U_{rms}$ (V)
28,1	27,1	Arame 1	9,8	281,5	285,9	29,7	29,8
		Arame 2	5,2	187,0	200,2	20,2	21,3
37,8	36,2	Arame 1	9,8	281,6	286,0	29,3	29,6
		Arame 2	5,2	188,1	201,8	20,2	21,7
47,2	45,1	Arame 1	9,8	274,5	283,7	29,7	30,3
		Arame 2	5,2	185,6	202,3	20,4	22,9
56,3	53,7	Arame 1	9,8	280,8	285,1	29,5	29,7
		Arame 2	5,2	186,3	200,1	21,0	22,5

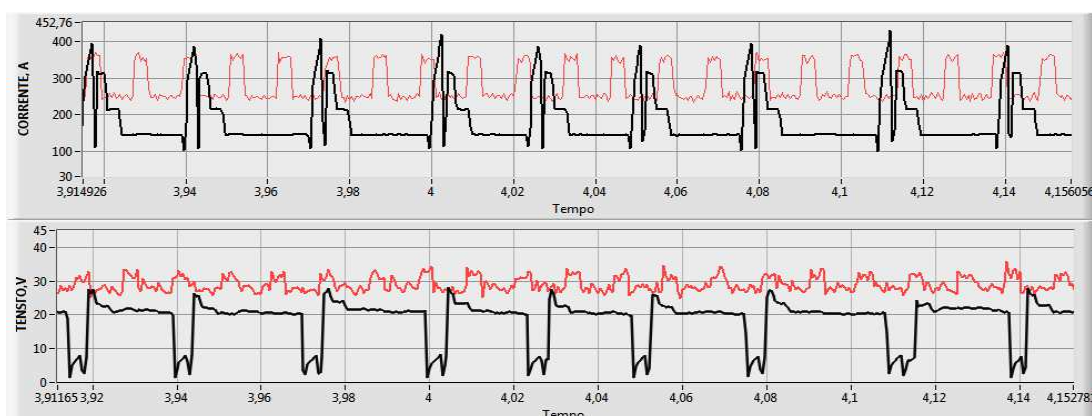
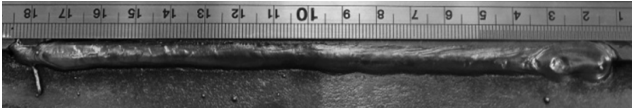
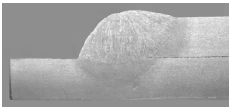
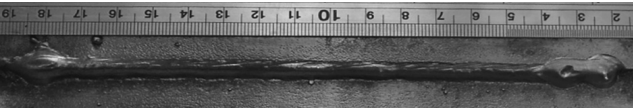
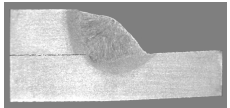
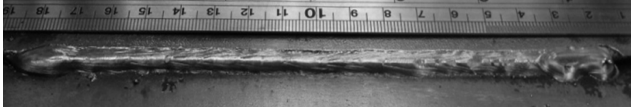
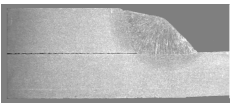
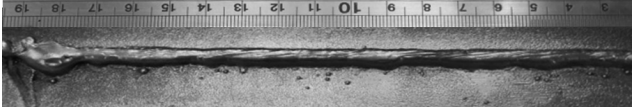
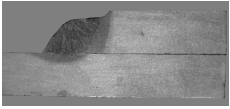
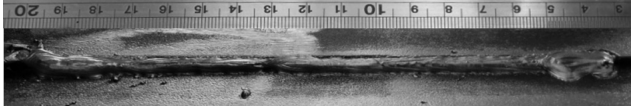


Figura 5.3 - Oscilograma típico de corrente e tensão para a soldagem com os parâmetros da Tab. 5.5 (MIG/MAG DA P-CCC)

Iniciaram-se as soldagens com a velocidade de soldagem 28,1 mm/s, que foi a velocidade com a qual o volume de solda tornou-se equivalente com a soldagem feita com processo P-P a uma velocidade de soldagem 30 mm/s. O acréscimo de velocidades de soldagem alcançou 56,3 mm/s. Como se pode observar na Tab. 5.6, o cordão já deixa de ser aceitável, apresentando uma interrupção do cordão. Observou-se que a instabilidade da formação do cordão foi provocada pelo arco de trás, que apagava continuamente. Diminuiu-se a velocidade de alimentação em 0,2 m/min do segundo arame e conseguiu-se soldar com esta velocidade de soldagem. Assim, neste caso, esta velocidade de soldagem (56,3 cm/min) foi considerada máxima limite para os parâmetros de soldagem utilizados.

Tabela 5.6 - Aspecto visual dos cordões de soldas das soldagens de chapa fina e as respectivas seções transversais (MIG/MAG DA P-CCC)

$V_s$ (mm/s)	Vista da superfície do cordão	Seção transversal
28,1		
37,8		
47,2		
56,3 (-0,2 $V_{a2}$ )		
56,3		Não verificado

## 5.4 Discussão e comparação dos resultados na soldagem de chapas finas em junta sobreposta na posição plana

### 5.4.1 Aspecto visual dos cordões de solda

Analisando-se os cordões de soldas feitos com ambos os processos, pode-se observar que todos têm um aspecto aceitável, com exceção daquelas soldas que foram consideradas acima das velocidades máximas limites de soldagem. As soldas apresentaram leves tendências de respingos, que podem ter tido como causa o tamanho do arco, muito curto. Outra observação que pode ser feita é que os cordões de soldas feitos com processo de soldagem MIG/MAG DA P-CCC apresentam um reforço maior.

### 5.4.2 Envelope operacional

As velocidades máximas limites encontradas na soldagem de chapa fina com processos de soldagem MIG/MAG DA P-P e P-CCC estão demonstradas na Fig. 5.4, com o cálculo equivalente da quantidade de material depositado.

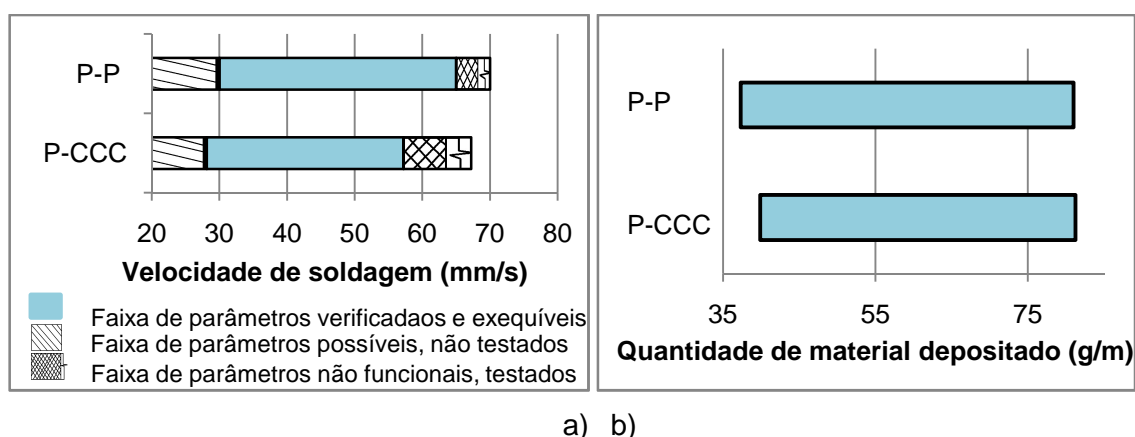


Figura 5.4 - Representação do envelope operacional: a) velocidades de soldagem limites; b) quantidade de material depositado

Analisando-se o gráfico das velocidades de soldagem, pode-se observar que o processo de soldagem MIG/MAG DA P-P tem uma faixa de velocidade de soldagem maior do que P-CCC. No caso do gráfico da quantidade de material depositado (os dados estão apresentados em Apêndice V), o P-P é capaz de depositar uma quantidade de material menor, com uma velocidade superior para os mesmos parâmetros de soldagem.

#### 5.4.3 Análise das seções transversais dos cordões de soldas

Analisando-se as sessões transversais de ambos os processos de soldagem com MIG/MAG DA, pode-se afirmar que os cordões feitos com o processo P-P apresentam uma tendência de penetração maior do que no caso do P-CCC. No caso do P-CCC, a ZAC é maior, em virtude da velocidade de soldagem ser inferior, mesmo se considerando um volume igual. Em termos das observações sobre a largura e o reforço, pode-se afirmar que o P-P apresenta um reforço menor e uma largura maior. Este resultado pode ser devido à força do jato de plasma, que no P é maior do que no CCC.

#### 5.4.4 Avaliação econômica

Do ponto de vista da velocidade de soldagem necessária para se depositar um mesmo volume de solda, o processo P-P apresenta uma velocidade maior em comparação com P-CCC, o que influencia o tempo de execução e, ao mesmo tempo, consome uma quantidade menor de gás de proteção. Por outro lado, o processo P-CCC apresenta uma

porcentagem menor de respingos (8,1% contra 11% para P-P). O cálculo da porcentagem de respingos está apresentado em Apêndice VII. Outra observação que pode ser feita é a de que o valor da tensão do arco seguidor, que no caso do P-CCC é menor em aproximadamente 5 V, pode levar a um consumo menor de energia.



## CAPÍTULO VI

### SOLDAGEM DE UM PASSE DE ENCHIMENTO NA POSIÇÃO SOBRECABEÇA

#### 6.1 Preparação e fixação das chapas de testes

As placas de testes para soldagem sobrecabeça foram preparadas da mesma forma e com as mesmas dimensões como as placas de testes para soldagem de um passe de enchimento na posição plana (ver item 4.1).

Para fixação das mesmas, foi utilizado um suporte multi-posicional desenvolvido no laboratório, conforme mostrado na Fig. 6.1. Como se pode observar, a tocha de soldagem foi posicionada perpendicular à superfície da chapa. Os arames eletrodos foram posicionados sequencialmente, sem nenhum ângulo de ataque. Utilizado uma DBCP de 21 mm.

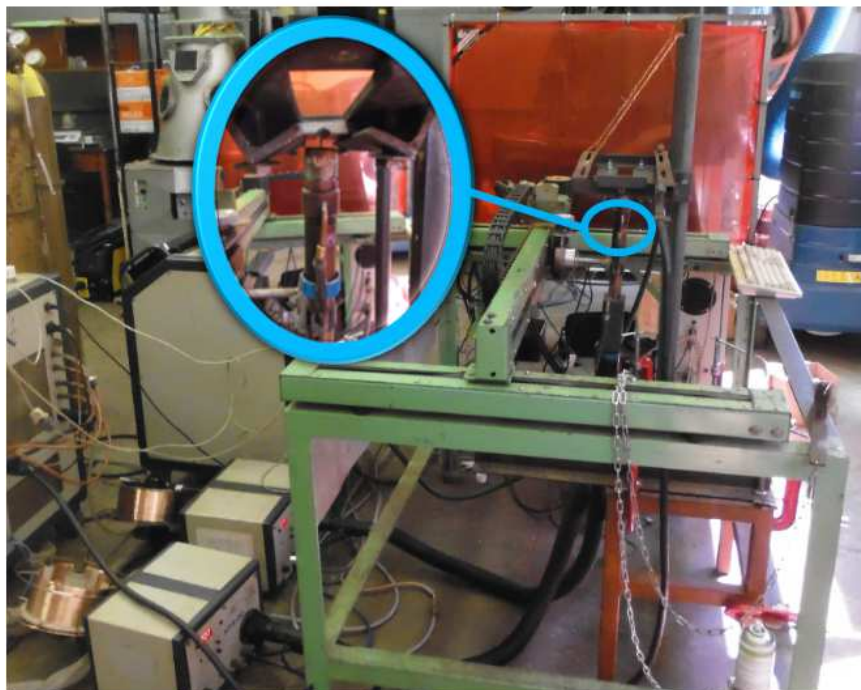


Figura 6.1 – Suporte para fixação de chapas de teste na posição sobrecabeça

## 6.2 Soldagem de um passe de enchimento na posição sobrecabeça com processo MIG/MAG DA P-P

Para soldagem no modo P-P, manteve-se a mesma premissa de se manter a corrente média do arame líder em torno de 280 A e do arame seguidor em 180 A. As fontes de soldagem foram sincronizadas usando-se uma defasagem de 5,8 ms.

Para achar os parâmetros necessários de soldagem, no início usaram-se os parâmetros da posição plana (Tab. 6.1). Regulou-se a velocidade de soldagem até o arco chegar à condição requerida, de ter um tamanho mínimo possível. Depois de se encontrar os parâmetros de soldagem adequados, tentou-se a soldar sobre uma chapa sem chanfro com velocidade de soldagem baixa (até 20 mm/s), mas todo o material depositado escorreu (caiu no chão). Passou-se, então, para a soldagem de chapas com chanfro. Na Tab. 6.2 estão demonstrados os parâmetros de soldagem monitorados, enquanto na Fig. 6.2 apresentam-se os oscilogramas de corrente e tensão típicos dessa condição de soldagem.

Tabela 6.1 – Parâmetros de soldagem regulados para soldagem do passe de enchimento na posição sobrecabeça com MIG/MAG DA P-P

Arame 1						Arame 2				
$V_s$ (mm/s)	$I_{p1}$ (A)	$t_{b1}$ (ms)	$I_{b1}$ (A)	$t_{b1}$ (ms)	$V_{a1}$ (m/min)	$I_{p2}$ (A)	$t_{p2}$ (ms)	$I_{b2}$ (A)	$t_{b2}$ (ms)	$V_{a2}$ (m/min)
11; 13; 16; 20;	360	3,5	260	8	10,1	360	3,5	108	8	6,2

Tabela 6.2 – Parâmetros de soldagem monitorados para soldagem de passe de enchimento na posição sobrecabeça com MIG/MAG DA P-P

$V_s$ (mm/s)	$V_{s \text{ real}}$ (mm/s)	Arame	$V_{a \text{ real}}$ (m/min)	$I_m$ (A)	$I_{rms}$ (A)	$U_m$ (V)	$U_{rms}$ (V)
11	11	Arame 1	9,5	279,5	282,9	26,8	26,9
		Arame 2	6,5	183,9	214,6	23,9	24,6
13	12,9	Arame 1	9,5	279,1	282,4	31,2	31,3
		Arame 2	6,5	179,7	210,8	26,9	27,2
16	15,7	Arame 1	9,5	279,8	283,1	30,5	30,6
		Arame 2	6,5	180,9	211,9	25,5	26,1
20	19,5	Arame 1	9,5	279,9	283,2	28,9	19,1
		Arame 2	6,5	180,2	211,4	25,2	25,6

Começou-se a soldar com a velocidade de soldagem de 11 mm/s e obteve-se um cordão aceitável. Aumentou-se a velocidade de soldagem para até 13 mm/s e obteve-se resultados bons. Com a velocidade de 16 mm/s o resultado foi satisfatório, mas com 20 mm/s o cordão de solda já apresentava uma aparência menos aceitável.

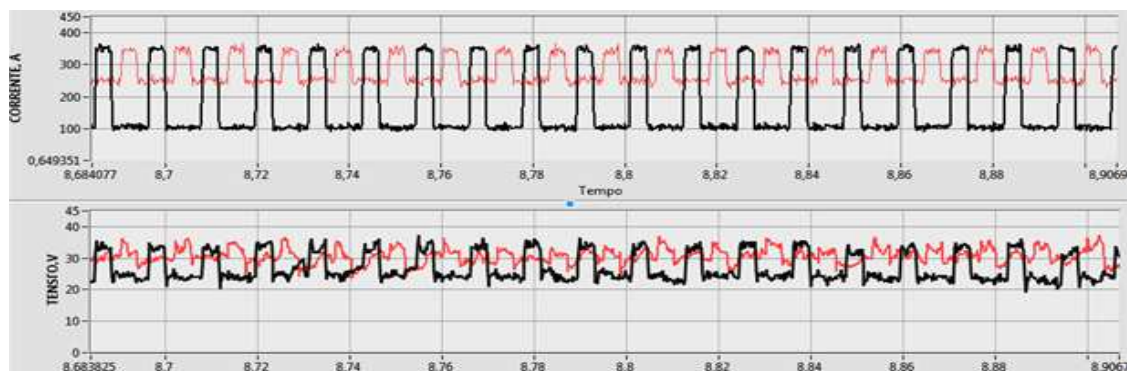


Figura 6.2– Oscilograma típico de corrente e tensão para a soldagem do passe de enchimento na posição sobrecabeça com os parâmetros da Tab. 6.1. (MIG/MAG DA P-P)

O aspecto visual dos cordões de soldas resultantes e as sessões transversais dessas estão apresentados em Tab. 6.3. Todas as soldas podem ser consideradas aceitáveis, menos a feita com a velocidade 20 mm/s.

Tabela 6.3 – Aspecto visual dos cordões de soldas das soldagens de passe de enchimento na posição sobrecabeça e as respectivas seções transversais com processo P-P

V <sub>s</sub> (mm/s)	Vista da superfície do cordão	Seção transversal
11		
13		
16		
20		

Como se pode observar, com o aumento da velocidade de soldagem, o cordão de solda tornou-se instável. As soldas apresentam uma penetração adequada, tanto na lateral, quanto no fundo do chanfro, sem apresentar falta de fusão. A macrografia dos cordões de soldas foi feita só para as soldas que não apresentaram descontinuidades e qual foram consideradas aceitáveis.

### 6.3 Soldagem de um passe de enchimento na posição sobrecabeça com processo MIG/MAG DA P-CCC

No caso da soldagem sobrecabeça com processo MIG/MAG DA P-CCC, a velocidade de soldagem foi calculada para se obter um volume igual de material depositado para as soldas feitas com processo de soldagem MIG/MAG DA P-P. Para todas as velocidades de soldagens, foram utilizados os mesmos parâmetros, como apresentados na Tab. 6.4. Na Tab. 6.5 estão apresentados os parâmetros monitorados durante a soldagem, enquanto na Fig. 6.3 apresenta-se o oscilograma de corrente e tensão.

Tabela 6.4 – Parâmetros de soldagem regulados para soldagem do passe de enchimento na posição sobrecabeça com MIG/MAG DA P-CCC

Arame 1							
V <sub>s</sub> (mm/s)	I <sub>p1</sub> (A)	t <sub>b1</sub> (ms)	I <sub>b1</sub> (A)	t <sub>b1</sub> (ms)	V <sub>a1</sub> (m/min)		
11,1; 13,2; 16,2; 20,2	365	255	3,5	8	10,5		
Arame 2							
I <sub>a1</sub> (A)	t <sub>a1</sub> (ms)	I <sub>a2</sub> (A)	t <sub>a2</sub> (ms)	V <sub>a</sub> (m/min)	I <sub>c1</sub> (A)	t <sub>c1</sub> (ms)	I <sub>c2</sub> (A)
328	2	220	3	6,6	95	0,5	105
t <sub>c2</sub> (ms)	I <sub>c3</sub> (A)	di3 (A/s)	U <sub>cc</sub> (V)	kr	tr <sub>1</sub> (ms)	tr <sub>2</sub> (ms)	Ia <sub>3</sub> (A)
0,6	224	120	10	1,8	0,6	0,6	160

Tabela 6.5 – Parâmetros de soldagem monitorados para soldagem de passe de enchimento na posição sobrecabeça com o MIG/MAG DA P-CCC

$V_s$ (mm/s)	$V_{s \text{ real}}$ (mm/s)	Arame	$V_a \text{ real}$ (m/min)	$I_m$ (A)	$I_{rms}$ (A)	$U_m$ (V)	$U_{rms}$ (V)
11,1	11	Arame 1	9,9	280,5	284,7	29,2	29,5
		Arame 2	6,3	181,6	194,2	18,9	19,8
13,2	13	Arame 1	9,9	281,9	286,5	28,4	28,5
		Arame 2	6,3	184,5	201,6	19,8	20,7
16,2	15,9	Arame 1	9,9	280,8	284,2	27,7	27,8
		Arame 2	6,3	180,5	211,7	23,9	22,5
20,2	19,6	Arame 1	9,9	281,0	285,5	29,6	29,7
		Arame 2	6,3	181,4	198,6	20,5	21,2

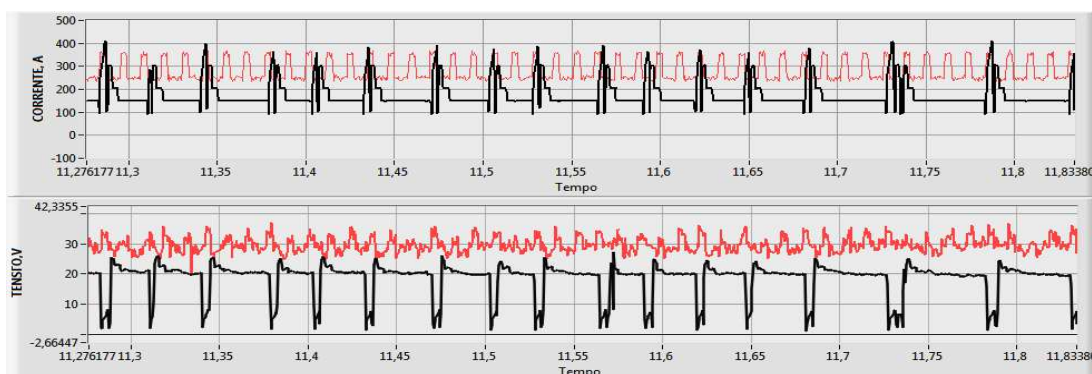

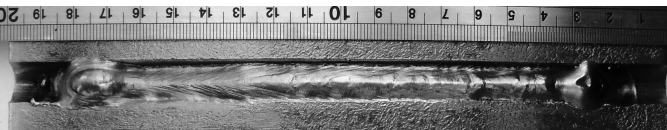
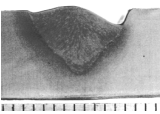

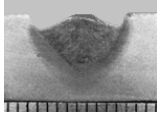
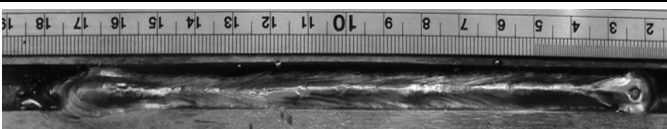
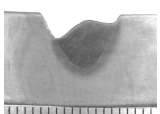


Figura 6.3 – Oscilograma típico de corrente e tensão para a soldagem do passe de enchimento na posição sobrecabeça com os parâmetros da Tab. 6.4 (MIG/MAG DA P-CCC)

A aparência dos cordões de soldas e as respectivas seções transversais obtidas com processo MIG/MAG DA P-CCC estão apresentadas na Tab. 6.6. Analisando-se as seções transversais dos cordões de solda, pode-se observar que todas as soldas apresentam uma leve tendência de escorrer (um cordão mais convexo), mas mesmo assim não houve falta de penetração e obteve-se uma penetração boa, tanto no lateral, quanto no fundo do chanfro. O cordão feito com a velocidade de soldagem 11,1 mm/s foi muito irregular. O cordão de solda começou a ficar estável na soldagem com a velocidade 13,2 mm/s e 16,2 mm/s. Já com a velocidade 20,2 mm/s, o cordão apresentou um formato não adequado.

Tabela 6.6 – Aspecto visual dos cordões de soldas das soldagens de passe de enchimento na posição sobrecabeça e as respectivas seções transversais com processo P-CCC

$V_s$ (mm/s)	Vista da superfície do cordão	Seção transversal
11,1		Não verificado
13,2		
16,2		
20,2		

#### 6.4 Discussão e análise dos resultados das soldagens de um passe de enchimento na posição sobrecabeça

##### a) Aspecto visual dos cordões de solda

Analisando-se o aspecto visual dos cordões de soldas feitos com ambos os processos, pode-se afirmar, em primeira fase dos testes, que o processo de soldagem com MIG/MAG DA P-P apresenta uma geometria de cordão mais estável, em uma faixa de velocidade de soldagem maior (11-16 mm/s) do que o P-CCC (13,2-16,2 mm/s). Da mesma forma como na condição de soldagem de um passe de enchimento na posição plana, as soldas feitas com P-CCC apresentam um reforço maior (convexidade maior). Como na posição plana, esse resultado deu-se em função do formato do arco, que no caso do P, tem uma pressão do arco maior. Na soldagem sobrecabeça, a pressão do arco pode ser um fator importante para a formação de um cordão de solda estável, ajudando a manter a poça de soldagem.

##### b) Análise da geometria dos cordões de soldas

Os resultados das medições das áreas transversais dos cordões de solda estão apresentados na Fig. 6.4 (a tabela com os dados das medições das características geométricas do cordão de solda estão apresentadas em Apêndice VI). As referidas seções transversais estão apresentadas na Tab. 6.7. Observa-se que o processo de soldagem P-P

na soldagem sobre cabeça apresentou uma área transversal maior. Com o aumento da velocidade, esta diferença tende a diminuir.

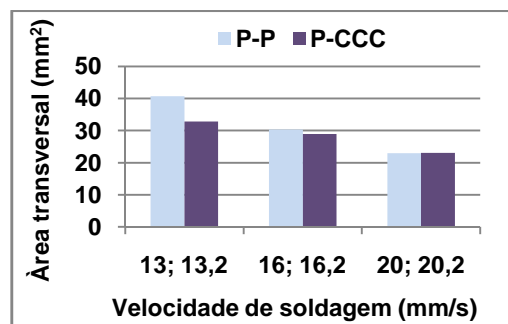
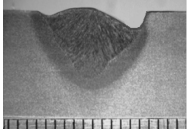
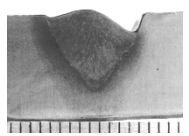
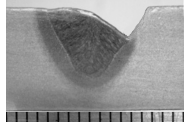
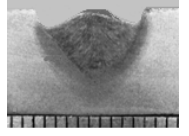
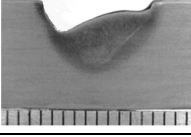
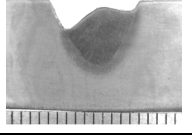


Figura 6.4 - Comparação entre as áreas transversais de cordões feitos pelos processos P-P e P-CCC a uma mesma corrente média e mesmo volume do cordão na soldagem sobre cabeça

Tabela 6.7 – Seções transversais dos cordões de soldas obtidos na posição sobre cabeça

$V_s$ (mm/s)	P-P	P-CCC
13; 13,2		
16; 16,2		
20; 20,2		

No caso das áreas afetadas pelo calor, o processo P-CCC apresenta uma área menor, como pode ser observado na Fig. 6.5. Estes valores confirmam os resultados da soldagem de um passe de enchimento na posição plana, onde, da mesma forma, o P-P apresentou um ZAC maior. Pode-se dizer que a diferença aconteceu em virtude da velocidade de soldagem. No entanto, a diferença entre as velocidades de soldagem é pequena. Outro fator pode ser a quantidade de calor maior gerado no caso do P.

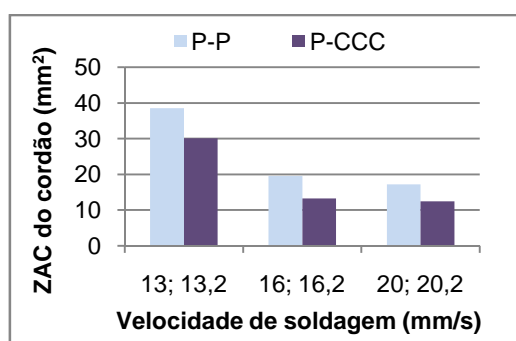
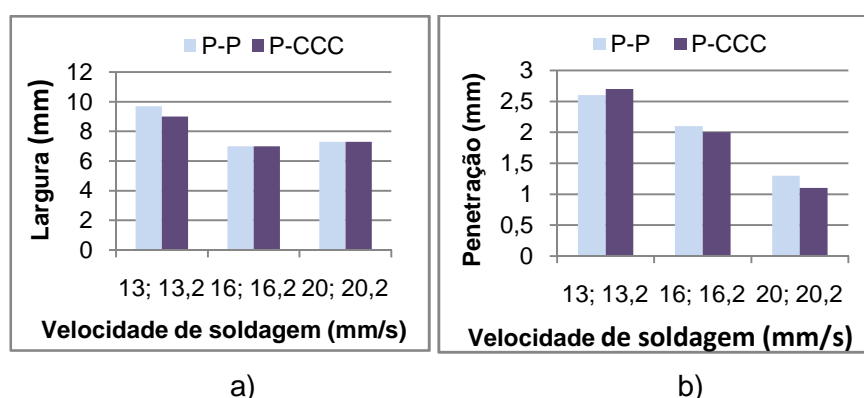


Figura 6.5 - Áreas das ZACs dos cordões de solda

As medições da largura dos cordões de solda mostraram valores aproximadamente iguais para ambos os processos, como mostra a Fig. 6.6 (a). Também quanto à penetração (Fig. 6.6 (b)), os resultados são aproximadamente os mesmos.



a)

b)

Figura 6.6 - Representação das medições da largura (a) e penetração (b) para as soldas obtidas na soldagem de passe de enchimento na posição sobrecabeça

O cálculo da eficiência de deposição dos processos mostrou que o P-CCC apresenta uma performance um pouco melhor, como ilustra a Fig. 6.7.

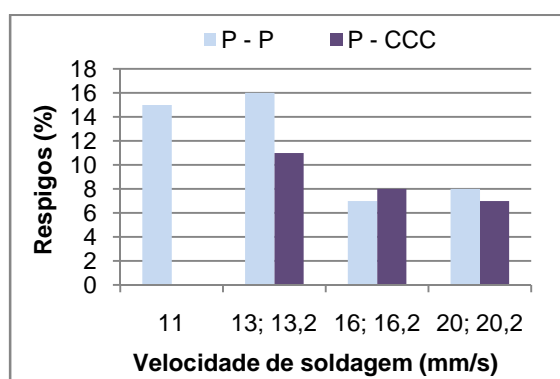


Figura 6.7 - Geração de respingos para diferentes velocidades de soldagem durante os testes na posição sobrecabeça com os processos P-P e P-CCC



Assim, em termos de economicidade, pode-se dizer que o processo P-CCC apresenta algumas vantagens na soldagem sobrecabeça: uma velocidade de soldagem um pouco mais alta (0,2 mm/s) do que P-P, gera uma quantidade menor de respingos e tem uma tensão menor no segundo arco o que pode levar a um consumo menor de energia.

### **6.5 Soldagem de um passe de enchimento na posição sobrecabeça com processo MIG/MAG DA P-CCC com uso de rampa de desaceleração da velocidade de alimentação do arame**

Quando da análise visual dos cordões de soldas na soldagem sobrecabeça com os processos P-P e P-CCC, o processo de soldagem P-P apresentou melhores resultados do ponto de vista do formato do cordão. Tentou-se encontrar a causa porque o P-P apresentou melhores resultados. Pensou-se sobre a transferência metálica do primeiro arame e como o tamanho do arco pode influenciar no formato do material transferido durante a solidificação da poça metálica.

Entretanto, não se estava conseguindo se soldar com arcos mais curtos na posição sobrecabeça. Como a fonte estava trabalhando no modo corrente constante, um menor arco seria conseguido com um aumento da velocidade de alimentação. Mas aí não se conseguia abrir o arco com estabilidade. Para tentar se trabalhar com um arco de menor comprimento usou-se a rampa de alimentação do arame do cabeçote. Repetiu-se a solda feita com a velocidade de soldagem 16,2 mm/s feita com P-CCC e obteve-se um cordão de solda aceitável. Aumentou-se a velocidade de soldagem até 25 mm/s e obteve-se um cordão com uma aparência superficial boa. Depois, aumentou-se a velocidade de soldagem em até 35 mm/s, situação em que o cordão começou a ficar instável no final da solda (considerou-se essa velocidade como a velocidade de soldagem máxima limite).

Efetou-se uma soldagem com velocidade de 12 mm/s para identificar a velocidade mínima de soldagem alcançável para esta condição de soldagem com P-CCC. A solda apresentou uma aparência inaceitável e essa velocidade foi considerada como velocidade de soldagem mínima.

Os parâmetros de soldagem regulados estão apresentados na Tab. 6.8 e os parâmetros adquiridos na Tab. 6.9. Como uso da rampa, aumentou-se a velocidade de alimentação no primeiro arame (de 10,5 m/min (9,9 real) para até 11,3 m/min (10,6)). Fazendo-se uma análise entre os parâmetros de soldagem monitorados com o uso da rampa e sem o uso da rampa no arame líder, não se observou nenhuma mudança dos valores das correntes médias (esperado por ser o pulsado um modo de corrente constante

puro). No caso do arame seguidor, aumentou a corrente média em 20 A quando se utilizou a rampa, já que havendo curto-circuito pode haver esta diferença entre o regulado e monitorado.

Tabela 6.8 – Parâmetros de soldagem regulados para soldagem do passe de enchimento na posição sobrecabeça com MIG/MAG DA P-CCC com uso da rampa de desaceleração da velocidade de alimentação do arame

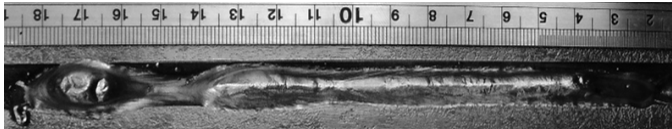
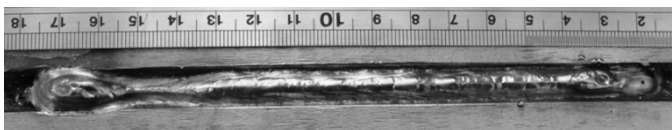
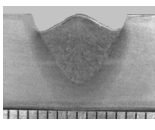
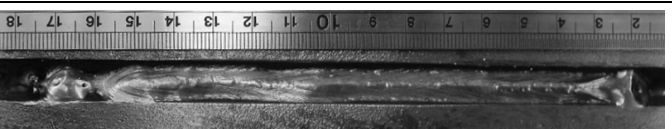
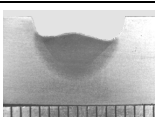
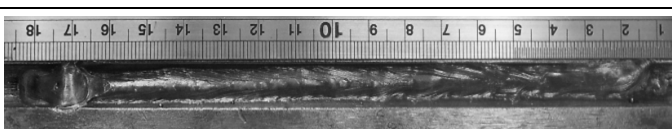
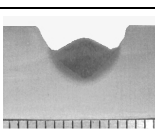
Arame 1							
$V_s$ (mm/s)	$I_{p1}$ (A)	$t_{b1}$ (ms)	$I_{b1}$ (A)	$t_{b1}$ (ms)	$V_{a1}$ (m/min)		
12; 16,2; 25; 35	365	255	3,5	8	11,3		
Arame 2							
$I_{a1}$ (A)	$t_{a1}$ (ms)	$I_{a2}$ (A)	$t_{a2}$ (ms)	$V_a$ (m/min)	$I_{c1}$ (A)	$t_{c1}$ (ms)	$I_{c2}$ (A)
328	2	220	3	6,6	95	0,5	105
$t_{c2}$ (ms)	$I_{c3}$ (A)	$di3$ (A/s)	$U_{cc}$ (V)	kr	$tr_1$ (ms)	$tr_2$ (ms)	$Ia_3$ (A)
0,6	224	120	10	1,8	0,6	0,6	160

Tabela 6.9 – Parâmetros de soldagem monitorados para soldagem de passe de enchimento na posição sobrecabeça com o MIG/MAG DA P-CCC com uso da rampa de desaceleração da velocidade de alimentação do arame

$V_s$ (mm/s)	$V_{s \text{ real}}$ (mm/s)	Arame	$V_{a \text{ real}}$ (m/min)	$I_m$ (A)	$I_{rms}$ (A)	$U_m$ (V)	$U_{rms}$ (V)
12	11,3	Arame 1	10,6	280,7	284,0	28,8	28,9
		Arame 2	6,3	198,3	210,7	19,1	20,5
16,2	15,3	Arame 1	10,6	281,9	286,5	28,9	29,2
		Arame 2	6,3	200,1	213,2	19,7	21,0
25	23,6	Arame 1	10,6	282,0	286,6	28,2	28,6
		Arame 2	6,3	196,8	208,3	20,3	21,7
35	33	Arame 1	10,6	282,3	286,9	25,6	26,9
		Arame 2	6,3	203,2	215,8	19,7	21,1

A aparência visual e as seções transversais dos cordões de soldas efetuados com o uso da rampa de desaceleração da velocidade de alimentação do arame estão apresentadas na Tab. 6.10.

Tabela 6.10 – Aspecto visual dos cordões de soldas das soldagens de passe de enchimento na posição sobrecabeça com uso da rampa de desaceleração da velocidade de alimentação do arame e as respectivas seções transversais com processo P-CCC

$V_s$ (mm/s)	Vista da superfície do cordão	Seção transversal
12		Não verificado
16,2		
25		
35		

## 6.6 Soldagem de um passe de enchimento na posição sobrecabeça com processo MIG/MAG DA P-P com uso da rampa de desaceleração da velocidade de alimentação do arame

Observou-se que no caso do uso da rampa de desaceleração da velocidade de alimentação do arame na soldagem com P-CCC resultou em aumento na faixa operacional da velocidade de soldagem. Assim, tentou-se também aplicar a rampa para soldar com P-P, para verificar se existia alguma influência. Começou-se a soldar com a velocidade de soldagem máxima alcançada com P-CCC, que para um mesmo volume depositado no caso do P-P foi de 36 mm/s. O resultado da solda foi aceitável. Aumentou-se a velocidade de soldagem até 40 mm/s, depois para 45 mm/s e 50 mm/s. No caso da soldagem efetuada com a velocidade de soldagem 50 mm/s, a solda começou a ficar instável, considerando-se como a velocidade máxima limite alcançável para esta condição de soldagem.

Efetuuou-se também soldagens para identificar a velocidade mínima de soldagem. Começou-se a soldar com a velocidade de 8 mm/s, mas o arco perfurou a chapa. Aumentou-se a velocidade de soldagem até 9 mm e o cordão ficou não aceitável. Verificou-se uma solda com a velocidade de soldagem de 11 mm/s e obteve-se uma solda aceitável. Esta velocidade de soldagem foi considerada como a velocidade mínima de soldagem para

soldagem de um passe de enchimento na posição sobre cabeça com P-P com uso da rampa de desaceleração da velocidade de alimentação do arame.

Para se efetuar as soldas com todas as velocidades testadas, foram usados os mesmos parâmetros de soldagem regulados apresentados na Tab. 6.11. Os parâmetros monitorados estão apresentados na Tab. 6.12. Analisando-se os parâmetros de corrente e tensão, pode-se observar que da mesma forma a corrente média do segundo arame ficou maior do que sem rampa, neste caso, com aproximadamente 15 A, enquanto o valor da corrente média do arame 1 não se alterou significativamente.

Tabela 6.11 – Parâmetros de soldagem regulados para soldagem do passe de enchimento na posição sobre cabeça com MIG/MAG DA P-P com uso da rampa


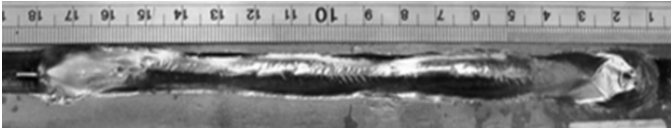
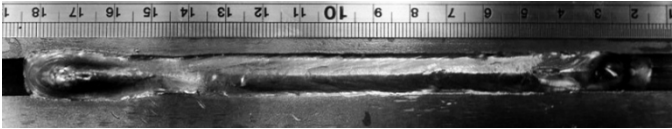
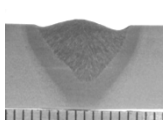
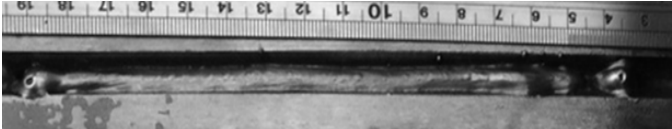
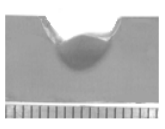
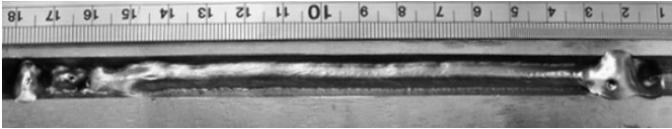
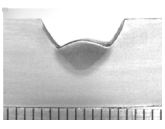
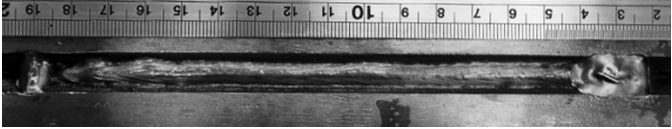
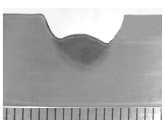
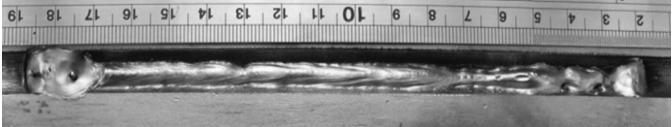
Arame 1						Arame 2				
$V_s$ (mm/s)	$I_{p1}$ (A)	$t_{b1}$ (ms)	$I_{b1}$ (A)	$t_{b1}$ (ms)	$V_{a1}$ (m/min)	$I_{p2}$ (A)	$t_{p2}$ (ms)	$I_{b2}$ (A)	$t_{b2}$ (ms)	$V_{a2}$ (m/min)
9; 11; 36; 40; 45; 50	360	3,5	260	8	11,3	360	3,5	108	8	6,5

Tabela 6.12 – Parâmetros de soldagem monitorados para soldagem de passe de enchimento na posição sobre cabeça com o MIG/MAG DA P-P com uso da rampa

$V_s$ (mm/s)	$V_{s \text{ real}}$ (mm/s)	Arame	$V_{a \text{ real}}$ (m/min)	$I_m$ (A)	$I_{rms}$ (A)	$U_m$ (V)	$U_{rms}$ (V)
11	11	Arame 1	10,6	286,0	291,4	30,0	30,1
		Arame 2	6,8	199,8	224,5	23,2	23,6
36	34,5	Arame 1	10,6	285,8	290,9	29,0	29,2
		Arame 2	6,8	203,7	228,2	22,9	23,6
40	38,3	Arame 1	10,6	286,2	291,3	30,0	10,1
		Arame 2	6,8	205,6	230,2	22,6	23,3
45	43	Arame 1	10,6	285,6	290,6	29,5	29,7
		Arame 2	6,8	204,2	229,0	23,1	23,7
50	47,7	Arame 1	10,6	286,1	291,9	30,7	30,9
		Arame 2	6,8	205,8	230,5	23,1	23,8

As soldas realizadas com uso da rampa de desaceleração da velocidade de alimentação do arame na soldagem sobre cabeça do passe de enchimento com o processo MIG/MAG DA P-P estão apresentadas na Tab. 6.13.

Tabela 6.13 – Aspecto visual e as respectivas seções transversais dos cordões de soldas das soldagens de passe de enchimento na posição sobrecabeça com uso da rampa de desaceleração da velocidade de alimentação do arame na soldagem com processo P-P

$V_s$ (mm/s)	Vista da superfície do cordão	Seção transversal
8		Não verificado
9		Não verificado
11		
36		
40		
45		
50		Não verificado

## 6.7 Discussão e análise dos resultados na soldagem de um passe de enchimento na posição sobrecabeça com uso da rampa de desaceleração da velocidade de alimentação do arame

### a) Aspecto visual dos cordões de solda

Com uso da rampa de desaceleração da velocidade de alimentação do arame nos dois casos, tanto para soldagem com P-P, quanto para soldagem com P-CCC, aumentou-se a qualidade das soldas e aspecto visual. Obtiveram-se soldas aceitáveis e uniformes até certa velocidade de soldagem mínima limite ou máxima limite.

*b) Envelope operacional*

Com uso da rampa de desaceleração da velocidade de alimentação do arame na soldagem de um passe de enchimento na posição sobre cabeça, pôde-se aumentar o mapa operacional da velocidade de soldagem tanto para soldagem com P-CCC, quanto para P-P. O mapa operacional das velocidades de soldagem e a resultante quantidade de material depositado na faixa operacional estão apresentados na Fig. 6.8. O processo P-P apresentou uma faixa operacional maior do que o P-CCC.

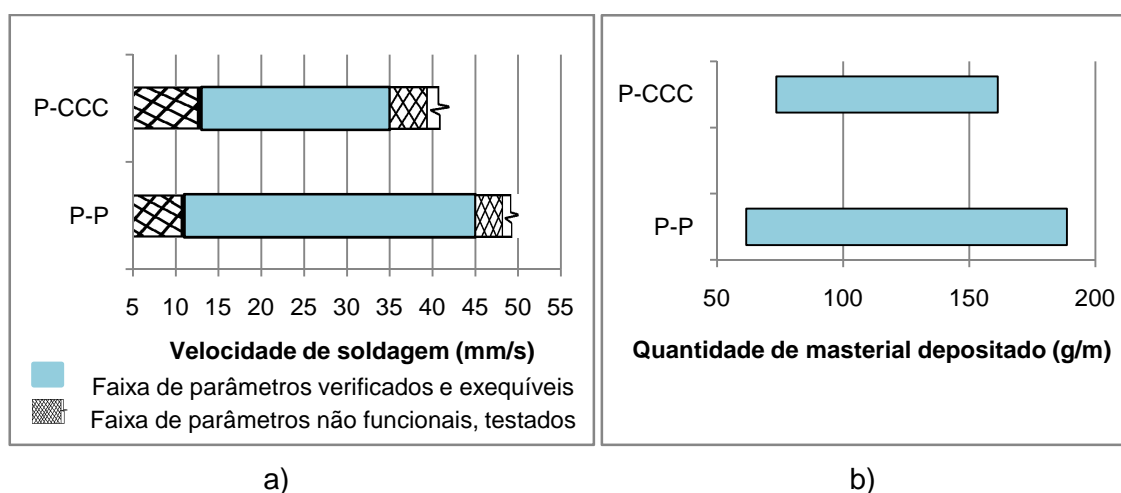


Figura 6.8 – Mapa operacional da velocidade de soldagem na soldagem sobre cabeça com uso da rampa (a) e a quantidade de material depositado para estas condições (b)

*c) Análise da geometria dos cordões de soldas*

Os resultados das medições das áreas transversais e das zonas afetadas pelo calor dos cordões de soldas estão apresentados na Fig. 6.9 e 6.10, respectivamente. Observa-se a coerência das áreas se reduzirem para maiores velocidades de soldagem. Mas a análise comparativa das áreas foi feita somente para a velocidade de soldagem 35 mm/s, no caso do P-CCC, e 36 mm/s para o P-P, as únicas semelhantes. Para estas velocidades de soldagem, o cordão feito com P-CCC apresentou uma área transversal maior e um ZAC menor, mas as diferenças são insignificantes.

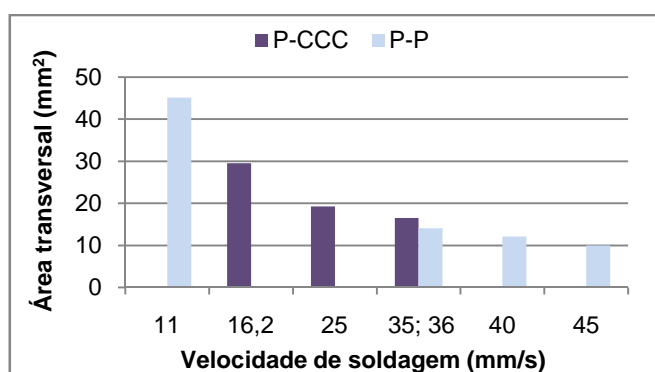


Figura 6.9 - Resultados das medições das áreas transversais dos cordões de soldas com uso da rampa na soldagem de passe de enchimento sobrecabeça

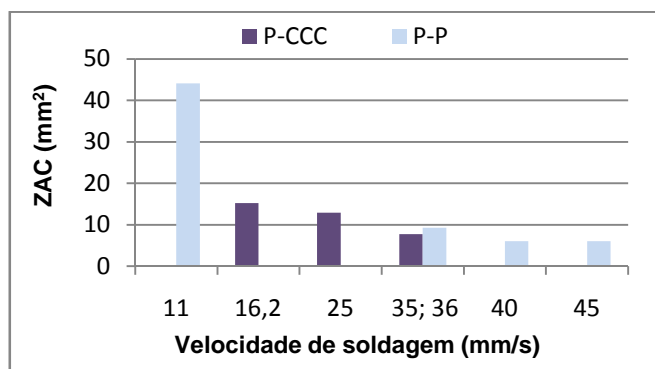


Figura 6.10 – Resultados das medições das zonas afetadas pelo calor na soldagem sobrecabeça com uso da rampa de desaceleração da velocidade de alimentação do arame

Durante as medições da penetração e da largura, o P-P apresentou uma tendência de penetração maior (Fig. 6.11) e uma largura menor (Fig. 6.12). As diferenças também foram pequenas. Mas observa-se novamente a coerência dos valores se reduzirem para maiores velocidades de soldagem.

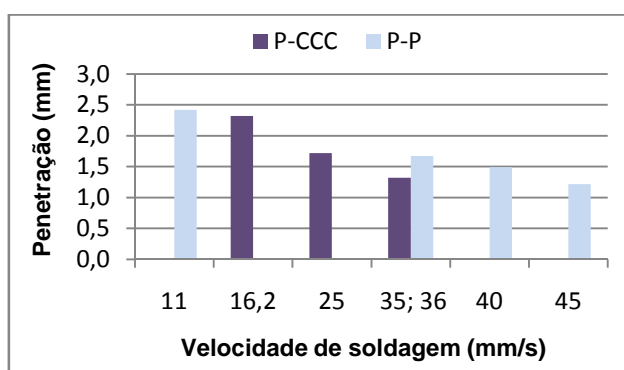


Figura 6.11 – Resultados das medições da penetração na soldagem sobrecabeça com uso da rampa de desaceleração da velocidade de alimentação do arame

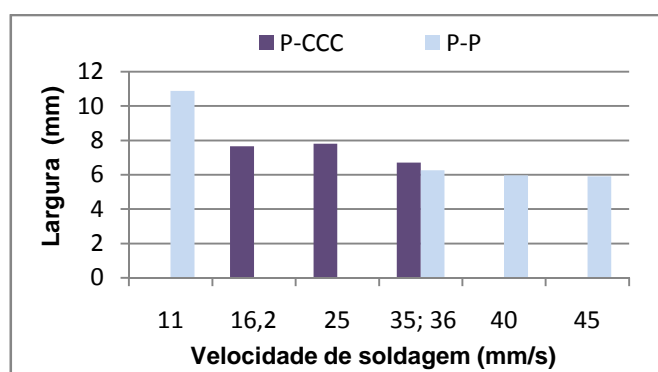


Figura 6.12 – Resultados das medições da largura na soldagem sobrecabeça com uso da rampa de desaceleração da velocidade de alimentação do arame

d) *Análise da influência do uso da rampa de desaceleração da velocidade de alimentação do arame sobre a geometria do cordão de solda*

Para se observar como o uso da rampa influenciou a geometria do cordão de solda, foram feitas as medições dos cordões de soldas efetuados pelo mesmo processo e com uma mesma velocidade, não comparando-se os resultados entre os processos. No caso do P-CCC, as medições foram feitas em cordões de solda efetuados com a velocidade de soldagem de 16,2 mm/s com uso da rampa e a velocidade 16 mm/s sem uso da rampa, enquanto no caso do P-P as medições foram feitas para a velocidade de soldagem de 11 mm/s com uso da rampa e a velocidade de soldagem 11,1 mm/s sem uso da rampa. O uso da rampa no primeiro arame para a soldagem com processo P-CCC apresentou uma leve tendência de aumento da área transversal do cordão e da ZAC. Uma diferença maior foi observada no caso da soldagem com P-P. Os gráficos das medições estão apresentados na Fig. 6.13.

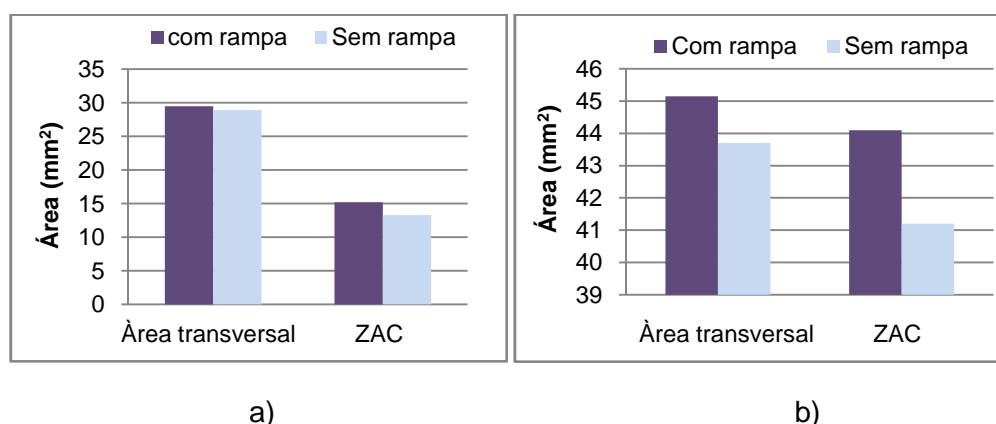


Figura 6.13 - Comparação entre as áreas transversais do cordão e as áreas das zonas afetadas pelo calor para o caso do uso da rampa e sem uso da rampa na soldagem sobrecabeça: a) P-CCC Vs=16,2 mm/s e b) P-P Vs=11 mm/s



Na comparação entre as soldas feitas com P-CCC com a velocidade 16,2 mm/s com uso da rampa e a velocidade 16 mm/s sem uso da rampa, também, feita com P-CCC, os parâmetros regulados são os mesmos só que a velocidade de alimentação é diferente. No caso do uso da rampa, a velocidade de alimentação real ficou 10,6 m/min e no caso da soldagem sem rampa, 9,9 m/min. Na análise dos parâmetros adquiridos em arame líder, observou-se que o valor da corrente média é aproximadamente igual, mas no caso do arame seguidor, a corrente média na soldagem sem rampa, ficou 180 A, e no caso do uso da rampa aumentou até 200 A.

No caso da soldagem com P-P para se fazer as soldas com a velocidade de soldagem 11 mm/s com e sem uso da rampa, usou-se os mesmo parâmetros regulados, neste caso a velocidade de alimentação no arame líder aumentou de 9,5 m/min no caso de soldagem sem rampa, até 10,6 m/min na soldagem com rampa. Em arame seguidor, também, observou-se um aumento de 0,3 m/min no caso do uso da rampa. Analisando-se os parâmetros adquiridos, a corrente média do arame líder, nos dois casos, não tem uma diferença significativa. No caso da soldagem sem rampa, a corrente média do arame líder ficou 280 A e no caso do uso da rampa ficou 286 A. Os valores das correntes médias para o arame seguidor apresentam uma diferença de 15 A no caso do uso da rampa.

As medições da penetração (Fig. 6.14) não apresentaram diferenças com ou sem o uso da rampa em nenhuma das situações para os dois processos de soldagem. Uma leve tendência de aumento da largura resultou no caso do uso da rampa nos dois casos.

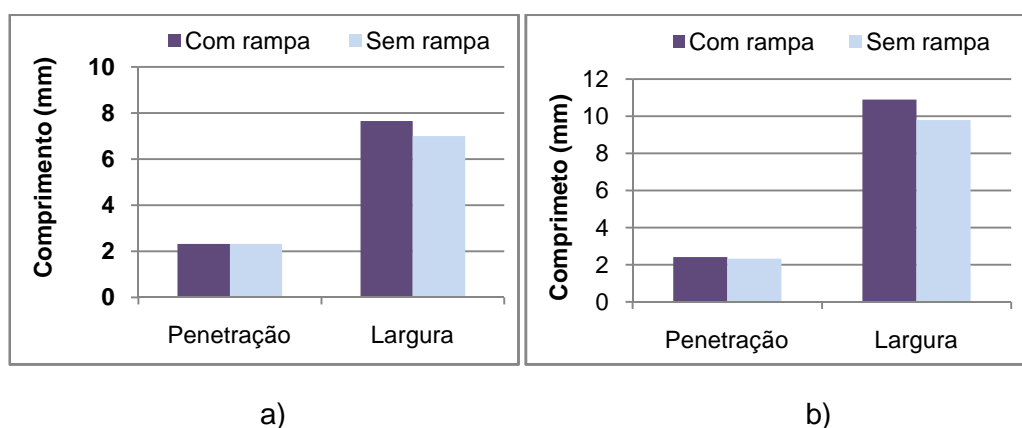


Figura 6.14 - Comparação entre a penetração e largura do cordão de solda feita com uso da rampa e sem uso da rampa na soldagem sobrecabeça: a) P-CCC Vs=16,2 mm/s e b) P-P Vs=11mm/s

### 6.8 Influência do comprimento do arco do segundo arame na estabilidade e formação do cordão de solda na soldagem sobrecabeça com processo MIG/MAG DA P-P

Durante os experimentos da soldagem sobrecabeça com processo MIG/MAG DA P-CCC com velocidade baixa, observou-se que o material fundido na ponta do arame 2 se acumulava para baixo e, depois que chegava a certo tamanho, tocava a poça e fazia a transferência para a chapa, aproximadamente como é apresentado na Fig. 6.15. Este fenômeno não foi observado durante a soldagem sobrecabeça com processo de soldagem P-P. Analisando-se os modos de transferência metálica dos processos (P e CCC), pode-se dizer que, no caso do P, o material derretido se transfere gota por gota. Como a intensidade da corrente de pulso no P, resulta uma força de expulsão da gota (efeito pinch). No caso do CCC, a transferência metálica é feita por curto-circuito, o material derretido precisa tocar a poça para que as forças devido à tensão superficial, auxiliadas pelo efeito pinch da corrente de curto-circuito, separe a gota da ponta do eletrodo. Neste caso, o material fundido se acumula na ponta do eletrodo até quando o tamanho da gota atinge uma dimensão que toca a poça e depois se inicia os efeitos tensão superficial-corrente de curto-circuito. Mas enquanto não toca a poça, a gota é puxada para baixo pela força da gravidade.

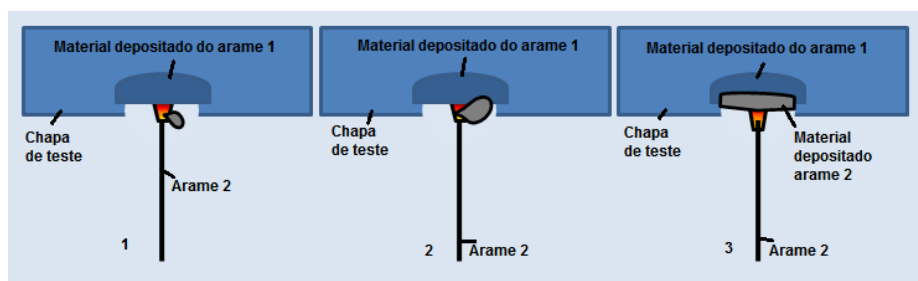


Figura 6.15 – Esquematisação da transferência metálica durante a soldagem com velocidade baixa no caso do uso do processo P-CCC

Dessa forma, acredita-se que o comprimento do segundo arco tenha também influência marcante sobre a formação do cordão de solda na soldagem sobrecabeça. Corroborando, pode-se observar que todas as soldas confeccionadas com P-P têm uma aparência de cordão melhor do que os cordões de soldas feitos com P-CCC. As soldas feitas com P-CCC apresentam um reforço maior e maior tendência de escorrer. Pensou-se, dessa forma, que no caso do P-P tem-se uma qualidade melhor das soldas por causa da transferência metálica e do formato do arco, que no caso do P, é maior e confere molhabilidade e pressão maiores sobre a poça.

Presumiu-se que a qualidade do cordão de solda é diretamente ligada ao formato do arco e pensou-se que no caso do uso de um arco maior, usando-se os mesmos parâmetros de soldagem e diminuindo-se a velocidade de alimentação com 0,2 m/min no arame seguidor, podia-se obter um cordão de solda com uma qualidade melhor. Desta forma, decidiu-se soldar com uma velocidade de soldagem mais crítica do que a velocidade mínima limite de soldagem considerada na soldagem de um passe de enchimento na posição sobrecabeça com uso da rampa. Escolheu-se a velocidade de 9 mm/s feita com P-P que deu resultado não aceitável. De uma menor velocidade de soldagem, é esperado um maior volume da poça para a mesma regulagem de parâmetros e, conseqüentemente, menor comprimento de arco.

Os parâmetros de soldagem regulados estão apresentados na Tab. 6.14 e os parâmetros monitorados na Tab. 6.15. Tentou-se aumentar a velocidade de alimentação do primeiro arame com 0,1 m/min e diminuiu-se a velocidade de arame no arame seguidor com 0,2 m/min para criar a condição de soldagem com um arco maior no segundo arame para verificar o que se presumiu anteriormente. A solda apresentou uma aparência aceitável mesmo com uma velocidade baixa de soldagem.

Tabela 6.14 – Parâmetros de soldagem regulados para soldagem sobrecabeça de um passe de enchimento com a velocidade de soldagem 9 mm/s com P-P

Arame 1						Arame 2				
$V_s$ (mm/s)	$I_{p1}$ (A)	$t_{b1}$ (ms)	$I_{b1}$ (A)	$t_{b1}$ (ms)	$V_{a1}$ (m/min)	$I_{p2}$ (A)	$t_{p2}$ (ms)	$I_{b2}$ (A)	$t_{b2}$ (ms)	$V_{a2}$ (m/min)
9	360	3,5	260	8	11,4	360	3,5	108	8	6,3

Tabela 6.15 – Parâmetros de soldagem monitorados para soldagem sobrecabeça de um passe de enchimento com a velocidade de soldagem 9 mm/s com P-P

$V_s$ (mm/s)	$V_{s \text{ real}}$ (mm/s)	Arame	$V_{a \text{ real}}$ (m/min)	$I_m$ (A)	$I_{rms}$ (A)	$U_m$ (V)	$U_{rms}$ (V)
9	9	Arame 1	10,7	285,9	290,9	29,7	29,9
		Arame 2	6,6	198,7	223,5	23,9	24,4

Na Tab. 6.16 estão apresentadas as aparências visuais das soldas feitas com a velocidade de soldagem de 9 mm/s e com uso dos parâmetros normais e com diminuição da velocidade de alimentação do arame seguidor.

Tabela 6.16 – Aspecto visual do cordão de solda e a respectiva seção transversal na soldagem sobre cabeça usando-se um arco maior no arame seguidor com P-P

$V_s$ (mm/s)	Vista da superfície do cordão	Seção transversal
9		Não verificado
9 $V_{a1}+0,1$ ; $V_{a2}-0,2$ ;		

### 6.9 Influência da espessura da chapa e da profundidade do chanfro sobre a formação do cordão de solda na soldagem sobre cabeça com MIG/MAG DA P-CCC

Depois dos experimentos do comprimento do arco, questionou-se se existe mais alguma causa pela qual as soldas do caso do P-CCC resultem em regularidades na soldagem na posição sobre cabeça. Depois de uma análise visual das soldas resultantes, tanto a aparência dos cordões quanto no verso das chapas, observou-se que no verso das chapas feitas com P-CCC para a velocidade de soldagem 11 mm/s e 12 mm/s apareceram alguns pontos mais brancos, no local que tende a escorrer o material da solda. As fotos destes cordões estão apresentadas na Tab. 6.17.

Tabela 6.17 – Análise visual dos cordões de soldas feitos com P-CCC na soldagem sobre cabeça

$V_s$ (mm/s)	Aparência do cordão de solda
11	
12	

Assim, pensou-se que, por causa da pequena dimensão entre o fundo do chanfro e a parte externa da chapa (5,52 mm), o calor fica mais concentrado na região do fundo do chanfro até a parte externa da chapa, como está esquematizado na Fig. 6.16. Para comprovar esta hipótese, pensou-se em aumentar a área entre o fundo do chanfro e a extremidade exterior da chapa, usando-se a mesma forma do chanfro e diminuindo a profundidade do chanfro. Para tal, prepararam-se chapas de testes da mesma espessura e foi feito um chanfro com 3,5 mm de profundidade. Soldou-se com a velocidade de soldagem de 11 mm/s usando-se os parâmetros com uso da rampa.

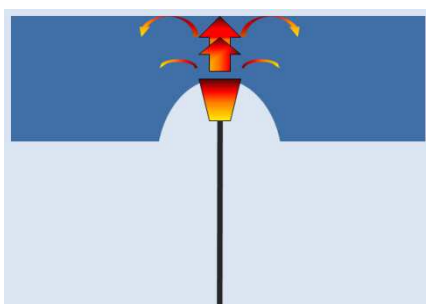


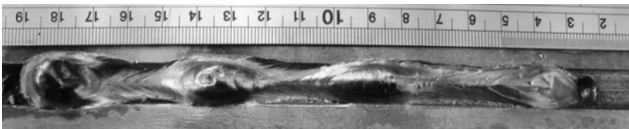
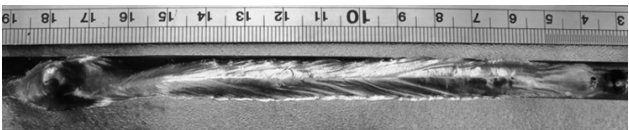
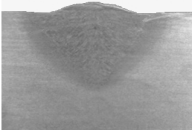
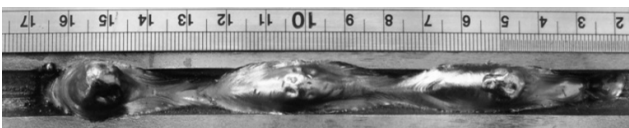
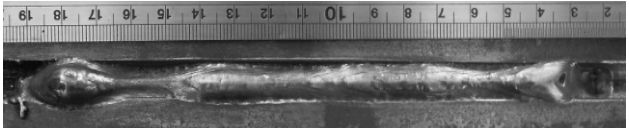
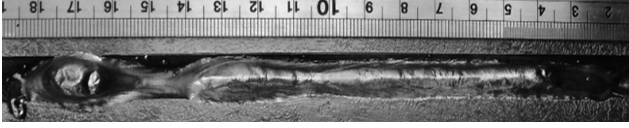
Figura 6.16 – A zona de concentração do calor gerado

Na Tab. 6.18 serão apresentados os cordões de soldas feitos com a velocidade de soldagem 11,1 mm/s sem uso da rampa que apresentou uma solda inaceitável, o cordão com a velocidade 12 mm/s com uso da rampa que foi considerado como a velocidade de soldagem mínima limite e a solda feita com a velocidade 11 mm/s com uso de um chanfro de 3,5 mm. Como se pode observar, o cordão de solda feito em um chanfro de 3,5 mm com a velocidade 11 mm/s apresentou uma aparência visual do cordão melhor do que no caso da soldagem com a velocidade 12 mm/s. Por isto, diminuiu-se a velocidade de soldagem até 10 mm/s, usando-se o mesmo tipo de chanfro de 3,5 mm e o cordão começou apresentar a mesma característica do cordão feito com a velocidade 11,1 mm/s no início dos testes.

Para se verificar mais uma vez se a área entre o fundo do chanfro e a parte externa da chapa influenciaria a qualidade do cordão, aumentou-se a espessura da chapa. Preparou-se chapas de testes com as mesmas dimensões iniciais do chanfro (10 mm largura e 4 mm profundidade). Usou-se uma chapa de 13 mm de espessura e conseguiu-se soldar com a velocidade de 10 mm/s, obtendo-se uma solda aceitável. Para a soldagem da verificação da influência da profundidade do chanfro, usaram-se os mesmos parâmetros para todas as velocidades de soldagem. Os parâmetros regulados de soldagem utilizados nesta condição estão apresentados na Tab. 6.19, e os parâmetros monitorados, na Tab. 6.20.

Fazendo-se uma análise da seção transversal desta solda, pode-se observar que tem um bom formato com penetração suficiente, tanto na lateral quanto no fundo do cordão, sem apresentar falta de fusão.

Tabela 6.18 – Aspecto visual dos cordões de soldagem e a respectiva seção transversal para soldagem com P-CCC

$V_s$ (mm/s)	Vista da superfície do cordão	Chanfro	Seção transversal
10		3,5 mm	Não verificado
10		4 mm	
11,1		4 mm	Não verificado
11		3,5 mm	Não verificado
12		4 mm	Não verificado

Neste aspecto, pode-se dizer que a qualidade de uma solda de um passe de enchimento executada na posição sobre cabeça é fortemente influenciada pela espessura entre o fundo do chanfro e a parte externa da chapa; num caso prático, esta dimensão seria o passe de raiz. Quanto maior é a espessura, menor é uma velocidade de soldagem possível, depositando-se uma quantidade de material maior, diminuindo-se os números de passes necessários a se efetuar para uma dada operação de enchimento com uma dada espessura.

Tabela 6.19 – Parâmetros de soldagem regulados para soldagem sobrecabeça para verificação da influência da profundidade do chanfro

Arame 1							
V <sub>s</sub> (mm/s)	I <sub>p1</sub> (A)	t <sub>b1</sub> (ms)	I <sub>b1</sub> (A)	t <sub>b1</sub> (ms)	V <sub>a1</sub> (m/min)		
10; 10; 11	365	255	3,5	8	11,3		
Arame 2							
I <sub>a1</sub> (A)	t <sub>a1</sub> (ms)	I <sub>a2</sub> (A)	t <sub>a2</sub> (ms)	V <sub>a</sub> (m/min)	I <sub>c1</sub> (A)	t <sub>c1</sub> (ms)	I <sub>c2</sub> (A)
328	2	220	3	6,6	95	0,5	105
t <sub>c2</sub> (ms)	I <sub>c3</sub> (A)	di3 (A/s)	U <sub>cc</sub> (V)	kr	tr <sub>1</sub> (ms)	tr <sub>2</sub> (ms)	Ia <sub>3</sub> (A)
0,6	224	120	10	1,8	0,6	0,6	160

Tabela 6.20 – Parâmetros monitorados da soldagem sobrecabeça para verificação da influência da profundidade do chanfro

$V_s$ (mm/s)	$V_{s \text{ real}}$ (mm/s)	Chanfro	Arame	$V_{a \text{ real}}$ (m/min)	$I_m$ (A)	$I_{rms}$ (A)	$U_m$ (V)	$U_{rms}$ (V)
10	10	4 mm	Arame 1	10,6	281,7	285,2	27,9	28,5
			Arame 2	6,3	200,3	212,3	20,2	20,8
10	10	3,5 mm	Arame 1	10,6	280,9	284,8	28,7	29,3
			Arame 2	6,3	200,1	213,2	19,9	21,0
11	11	3,5 mm	Arame 1	10,6	280,7	285,1	28,1	28,2
			Arame 2	6,3	201,3	212,7	20,9	21,8

## **CAPÍTULO VII**

### **CONCLUSÕES**

Tendo em vista os objetivos geral e específicos do trabalho, mas tomando em conta o caráter exploratório deste estudo, pode-se concluir que o uso do Curto-Circuito Controlado (CCC) no arame seguidor na soldagem de passes de enchimento, comparativamente ao MIG/MAG convencional (corrente pulsada nos dois arames), para uma mesma corrente média em cada arame e mesmo volume de cordão, é capaz de:

- Apresentar vantagens econômicas por apresentar uma leve tendência de maior produtividade:
  - por preencher o mesmo volume de solda em menor tempo (menor custo de mão de obra e de gases de proteção);
  - por gerar uma quantidade menor de respingos (menos material de adição consumido e menos retrabalho para remoção dos mesmos);
  - por consumir menos energia (menor tensão para a mesma corrente média).
- Apresentar melhor acabamento;
- Manter os mesmos mapas operacionais em soldagens na posição plana, apesar de diminuir o mesmo na soldagem sobre cabeça;
- Obter áreas transversais e ZACs menores (consequentemente, uma quantidade de deformações e tensões térmicas menores);
- Reduzir a penetração;
- Produzir cordões de solda mais convexos.



# CAPÍTULO VIII

## PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Para completar os estudos feitos neste trabalho, são feitas as seguintes propostas:

- Avaliar a influência de uso dos ângulos de ataque, tanto positivos, quanto negativos, na soldagem de passes de enchimento em todas as posições sobre a penetração e o formato do cordão de solda. Com o uso do ângulo de ataque, o valor da penetração pode aumentar ou diminuir em função do ângulo usado. Diminuindo-se a penetração, mas garantindo-se a fusão mínima necessária para o cordão (sem aparência da falta de fusão) e possível de obter cordões com áreas fundidas menores;
- Estudar a influência da distância entre os eletrodos sobre o formato de um cordão de solda, na soldagem de passes de enchimento em todas as posições. A distância entre os eletrodos pode ter efeito sobre o ciclo térmico da solda e sobre a geometria do cordão;
- Avaliar o uso da nova versão do equipamento de soldagem com Curto-Circuito Controlado, ou usar outros tipos de equipamentos capazes de gerar outros tipos de ondas de curto-circuito controlado: STT, RMD, CMT etc. A nova versão do CCC e outras variantes do curto-circuito controlado em configuração DA, pode aumentar o controle e a estabilidade do processo;
- Executar filmagens com a câmera de alta velocidade na posição sobrecabeça e avaliar a influência dos parâmetros de soldagem sobre a formação do cordão de solda na soldagem com duplo arame. Regulando-se uma transferência metálica com gotas de volumes menores, a poça metálica pode resfriar mais rápido, resultando cordões de soldas mais regulares;

- Estudar mais detalhadamente a influência do tipo de transferência metálica e do tamanho do arco sobre a qualidade do cordão de solda na soldagem com duplo arame na posição sobrecabeça;
- Verificar como o tipo e as dimensões de chanfro, bem como a espessura da chapa influenciam a estabilidade e o formato do cordão de solda feito na posição sobrecabeça com duplo arame. Um chanfro mais aberto vai ter uma superfície de transferência de calor menor, o que pode conduzir a um tempo de resfriamento do cordão mais longo, e assim, influenciar sobre a regularidade do cordão. Da mesma forma e a espessura da chapa, uma chapa mais espessa vai ter um ciclo de resfriamento mais rápido;
- Avaliar o uso da técnica de soldagem P-CCC em soldagem multipasse na posição sobrecabeça;
- Avaliar o uso da técnica de soldagem P-CCC em soldagem de passes de enchimento na posição vertical ascendente e descendente;
- Estudar a possibilidade de uso da técnica de soldagem P-CCC na soldagem orbital;
- Verificar como a distância entre os eletrodos influencia sobre o mapa operacional do processo DA. Com uma distância maior entre os eletrodos diminui a área total do cordão. Na soldagem com velocidade alta pode diminuir a mapa operacional;
- Analisar o formato, a geometria do cordão de solda, e o mapa operacional na soldagem com uso de CCC em dois arames. Utilizando-se CCC em ambos os arames podem se obter cordões de soldas com penetração adequada sem apresentar falta de fusão e reduzindo o calor imposto que por sua vez pode diminuir a área fundida e a zona influenciada pelo calor;
- Verificar e analisar a possibilidade de uso do CCC em polaridade positiva no arame líder e CCC em polaridade negativa em arame seguidor para passos de enchimento na posição plana. Utilizando-se CCC em polaridade negativa no arame seguidor pode conduzir a o aumento da produtividade para as mesmas faixas de correntes de trabalho.

- Verificar e analisar a geometria dos cordões de solda na soldagem de passes de enchimento com uso da CCC em polaridade negativa em ambos os arames. Na soldagem de passes de enchimento o passe de raiz responde da resistência da junta e os passos de enchimento devem encher a junta sem apresentar defeitos como falta de fusão. Utilizando-se a polaridade negativa em ambos os arames pode-se aumentar a taxa de deposição e obter soldas com penetração adequada tanto no fundo quanto no lateral da solda;
- Desenvolvimento de um programa sinérgico para o uso do processo CCC. Com o desenvolvimento de um programa sinérgico do CCC aumenta-se a acessibilidade do processo, tornando o processo ser menos sofisticado. Reduzindo o número de parâmetros que devem ser regulados, o pessoal menos qualificado vai ser capaz de usar esse tipo de processo, e no mesmo tempo diminuindo-se o tempo dedicado para o encontro dos parâmetros adequados de soldagem.

# CAPÍTULO IX

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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.

ARITA, H.; MORIMOTO, T.; NAGAOKA, S.; NAKANO, T. Development of Advanced 3 Electrode MAG High Speed Horizontal Fillet Welding Process. **IIW Doc**. No.XII-1896-06, 2006.

EGERLAND, S.; HILLS, G.; HUMER W. The Pulsed GMAW Twin-Wire (time-twin) Process for High Deposition Rate Welding of Thick Section Aluminum. **African Fusion**. p. 26-32, June 08 – September 09.

DEAN, G.; CUIURI, D.; NORRISH, J.; COOK, C. An Alternative Current Control Approach for dip Transfer GMAW. **IIW Doc**. No.XII-1891-06, 2006.

DERUNTZ, B.D. Assessing the Benefits of Surface Tension Transfer® Welding to Industry. **Journal of Industrial Technology**. Vol.19, No. 4, August-October 2003.

DUTRA, J.C.; SILVA, R.G. MIG/MAG – Transferência Metálica por Curto-Circuito sob Controle da Forma de Onda da Corrente – Sistemas CCC e STT – Fundamentos. **Soldagem e Insp**. São Paulo, Vol. 13, No. 2, p-92-96. Abr/Jun 2008.

EGERLAND, S. Controlled Gas Metal Arc Welding Processes an Assessment on Development. **Petro Min PIPELINER**, p. 34-49, Apr-Jun 2012.

ERA, T.; IDE, A.; UEZONO, T.; YAMAMOTO, H.; UEYAMA, T. Spatter Reduction of Steel Sheets Welding Using Controlled Bridge Transfer (CBT) GMA Process. **IIW Doc**. No.XII-1900-06, 2006.

ERA, T.; IDE, A.; UEZONO, T.; H.; UEYAMA, HIRATA, Y. Controlled Bridge Transfer (CBT) Gas Metal Arc Process for Steel Sheets Joining. **Welding International**. Vol.27, No. 4, p. 268-273, 2013.

FARAJIAN-SOHI, M.; JARVSTRAT, N. Formation and Detection of Weld Toe Imperfections in Tandem Gas Metal Arc Welding. Doc. 212-1074-05, 2005.

FROSTEVARG, J.; KAPLAN, A. F.H.; LAMAS, J. Comparison of CMT With Other Arc Modes for Laser Arc Hybrid Welding of 7 mm steel. Doc. XII-2147-13, 2013.

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

GONÇALVES, R.H.S.; GOHR, J.R.; DUTRA, J.C.; ALVES, M.O. CT-05 Soldagem MIG/MAG em Curto-Circuito Controlado (CCC) aplicada ao passe de raiz. XXXI CONSOLDA – CONGRESSO NACIONAL DE SOLDAGEM, 28 dezembro 2005, SP.

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, Setembro 1999, Belo Horizonte.

GROETELAARS, P.J.; MORAIS, C.O.; SCOTTI, A. Influence of Arc Length on Metal Transfer in the Single Potential Double-Wire MIG/MAG Process. **Welding International**. Vol. 23, No.2, p. 112-119, February 2009.

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

HEDEGÅRD, J.; TOLF, E.; ANDERSSON, J. High-Penetration Tandem-MIG/MAG Welding. **IIW Document**. N.XII-1918-07, 2007.

LEZZI, F.; COSTA, L. Development of Conventional Welding Process in Naval Construction. **Welding International**, 1.04.2013.

LI, P.; NYLEN, P.; MARKOCSAN, N.; KLEMENT, U. Characterization of Cold Lap Defects in Tandem Arc MAG Welding. 63TH ANNUAL ASSEMBLY& INTERNATIONAL CONFERENCE OF THE INTERNATIONAL INSTITUTE OF WELDING, 11-17 July 2010, Istanbul, Turkey.

LINCOLNELECTRIC. Tandem MIG. NX-3.70, 16p, 10.2005

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.

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.J.; SCOTTI, A. A Study on Out-of-Phase Current Pulses of the Double-Wire MIG/MAG Process with Insulated Potentials on Coating Application. **Welding and Cutting**. Vol.4, No.1, p.26-32, 2005.

MOTTA, M.F.; DUTRA, J.C. Efeitos das Variáveis do Processo MIG/MAG Duplo Arame com Potenciais Isolados nas Características Geométricas do Cordão de Solda. **Soldagem&Inspeção**. Vol. 10, N°1, p.22-30, Jan/Mar 2005.

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-Part II. **J. of Braz. Soc. Of Mech. Sci.&Eng.** Vol. XXIX, N°2, p. 207-210, April-June 2007.

NADZAM, J. Tandem GMAW: The Flexibility of Pulsed Spray Transfer. **Welding Innovation**. Vol. XIX, No.2, 2002.

OHNAWA, T.; UEZONO, T.; YAMAZAKI, K.; NAKATA, K.; USHIO, M. High Speed Welding of Steel Sheets by the Tandem Gas Metal Arc Welding System. **IIW Commission XII**, 7-9 July, 2003, Bucharest, Romania.

OGAWA, T.; ASAI, S. TSUBOI, R. Development of Narrow Gap Tandem GMAW Process. **IIW Doc.** XII-1811-04, 2004.

PICKIN, C.G.; WILLIAMS, S.W.; PRANGNELL, P.B.; ROBSON, J.; LUNT, M. Control of Weld Composition when Welding High Strength Aluminium Alloy Using the Tandem Process. **Science and Technology of Welding and Joining**. Vol.14, No. 8, 2009.

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. Preliminary Evaluation on Laser-Tandem GMAW. **Welding in the World**. Vol. 55, No. 9-10, p. 41-49, 2011.

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, October 2006.

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

SILVA, R.H.G; GOHR, Jr.R; OLIVEIRA, M.A. Controlled Short-Circuiting MIG/MAG welding (CCC) Applied to the Root Pass in the Construction of Offshore Oil Pipelines – Process Analysis Tools. 18th INTERNATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING, November 6-11, MG, 2005, Ouro Preto.

SILVA, R.H.S.; DUTRA, J.C. Controlled Short-Circuiting MIG/MAG Welding (CCC) – Process Analysis Tools. **Welding and Cutting**. 8, No. 3, 2009.

STAUFER, H. CMT-Twin – Expanding GMA-Tandem Welding. Doc.XII-2073-12.

STAVA, E. K. Technology Review: New Surface Transfer Tension Process Speeds Pipe Welding. **Pipe Line & Gas Industry**. Sept 1999.

STAVA, E. K. The Surface-Tension-Transfer Power Source: a new, Low-Spatter Arc Welding Machine. **Welding Journal**. 72(1), p. 25-29, 1993.

SILVA, R.H.G., DUTRA, J.C., GOHR Jr.R. Fundamentos Científicos e Tecnológicos para o Desenvolvimento do Processo MIG/MAG por Curto-Circuito Controlado (CCC) – Uma revisão da Literatura. Parte 3 de 3: Princípios dos sistemas MIG/MAG em Curto-Circuito com Controle de Corrente. **Soldagem Insp. São Paulo**. Vol. 13, No.1, p-70-81, Jan/Mar 2008.

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 Doc**. XII-2075-12.

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

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. **Science and Technology of Welding and Joining**. Vol. 10, N° 6, p. 750-759, 2005.

UEYAMA, T.; OHNAWA, T.; YAMAZAKI, K.; TANAKA, M.; USHIO, M.; NAKATA, K. High-Speed Welding of Steel Sheets by the Tandem Pulsed Gas Metal Arc Welding System. **Transactions of JWRI**. Vol.34, N°1, 2005.

UEYAMA, T.; OHNAWA, T.; TANAKA, M.; NAKATA, K. Occurrence of Arc Interference and Interruption in Tandem Pulsed GMA Welding. **IIW Doc**. No.XII-1883-06.

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**. Vol.14, N°4, p. 605-614, 2009.

YAPP, D.; BLACKMAN, S.A.Recent Developments in High Productivity Pipeline Welding. **J. of the Braz. Soc. of Mech. Sci&Eng**. Vol. XXVI, No.1, p. 89-97, January-March 2004.

YUDODIBOROTO, B. Y. B.; HERMANS, M.J.M.; RICHARDSON, I.M. Process Stability Analysis During Tandem Wire Arc welding. **IIW Doc**. No.XII-1876-06, 2006.



# APÊNDICE I

## CALIBRAÇÃO DA VELOCIDADE DE ALIMENTAÇÃO DOS CABEÇOTES DAS FONTES DE SOLDAGEM

Tabela A 1.1 - Calibração da velocidade de alimentação para o cabeçote da fonte MTE Digitec 600 - 1

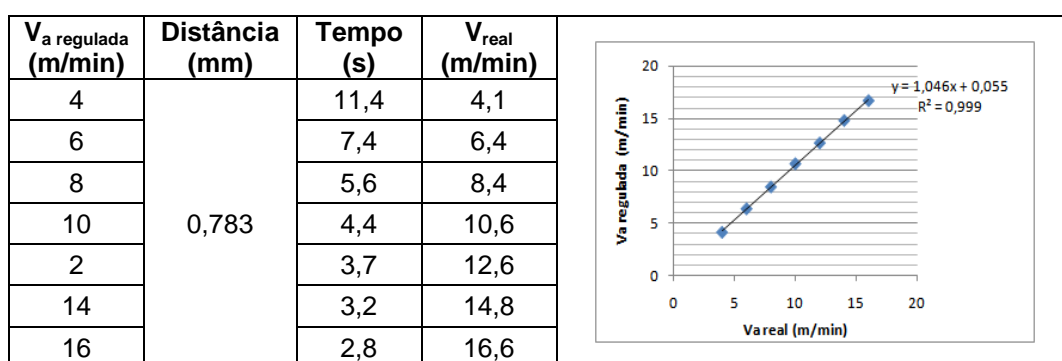


Tabela A 1.2 - Calibração da velocidade de alimentação para o cabeçote da fonte MTE Digitec 600 - 2

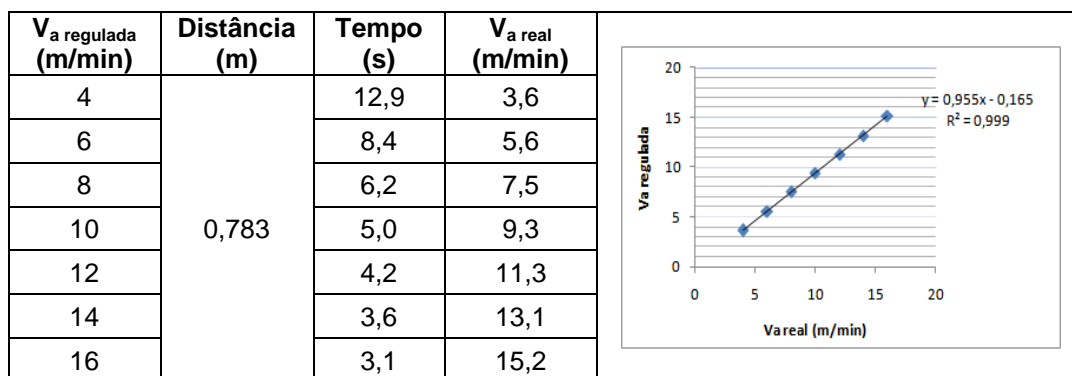


Tabela A 1.3 - Calibração da velocidade de alimentação para o cabeçote da fonte DIGIPlus

A7

$V_a$ regulada (m/min)	Distância (m)	Tempo (s)	$V_{areal}$ (m/min)
1	0,783	52,9	0,9
3		15,3	3,1
5		9,1	5,2
7		6,4	7,3
9		5,0	9,4
11		4,1	11,5
13		3,5	13,6
15		3,0	15,7
17		2,6	17,8
19		2,4	19,9

$y = 0,949x + 0,095$   
 $R^2 = 1$

## APÊNDICE II

### CALIBRAÇÃO DA VELOCIDADE DE MOVIMENTO DA MESA DE COORDENADAS ORTOGONAIS NO EIXO X

Tabela A 2.1 – Calibração da velocidade de movimento da mesa de soldagem

$V_a$ regulada (mm/s)	Tempo (s)	Distância (mm)	$V_a$ real (mm/s)
5	102,2	500	4,9
10	51,2		9,7
15	34,2		14,6
20	25,7		19,4
25	20,7		24,2
30	17,2		28,9
35	14,8		33,7
40	13,0		38,5
45	11,6		43,2
50	10,4		47,9
55	9,5		52,6
60	8,7		57,3
65	8,1		62,0
70	7,5		66,4
75	7,0		71,1
80	6,6		75,7

Gráfico de calibração da velocidade de movimento da mesa de soldagem. O eixo horizontal representa a velocidade real ( $V_a$  real) em m/min, variando de 0 a 90. O eixo vertical representa a velocidade regulada ( $V_a$  regulada) em m/min, variando de 0 a 80. Os dados são plotados como pontos azuis, mostrando uma forte correlação linear. A equação da reta de regressão é  $y = 0,942x + 0,625$  e o coeficiente de determinação é  $R^2 = 0,999$ .

## APÊNDICE III

### CALIBRAÇÃO DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS E OBTENÇÃO DE COEFICIENTES PARA O PROGRAMA LABVIEW

Tabela A 3.1 – Calibração para aquisição da corrente para fonte DIGITEC 600 – 1

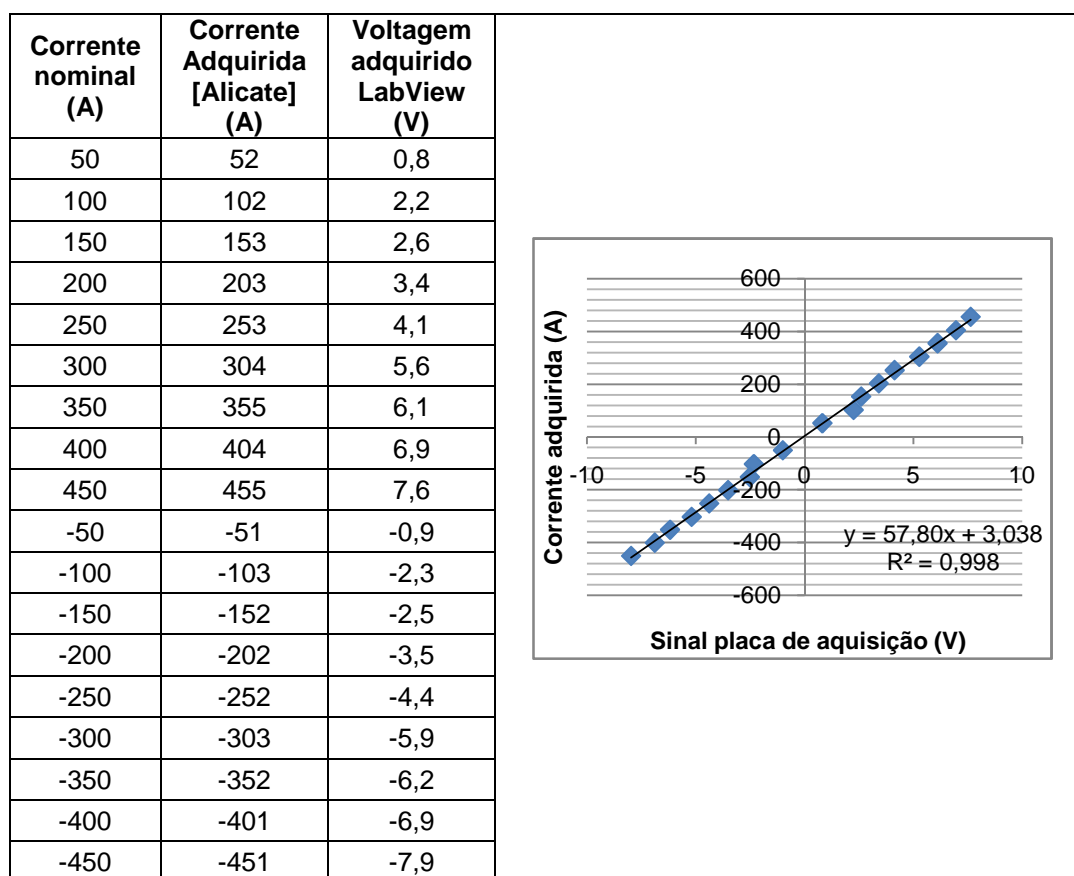


Tabela A 3.2 – Calibração para aquisição da tensão para fonte DIGITEC 600 – 1

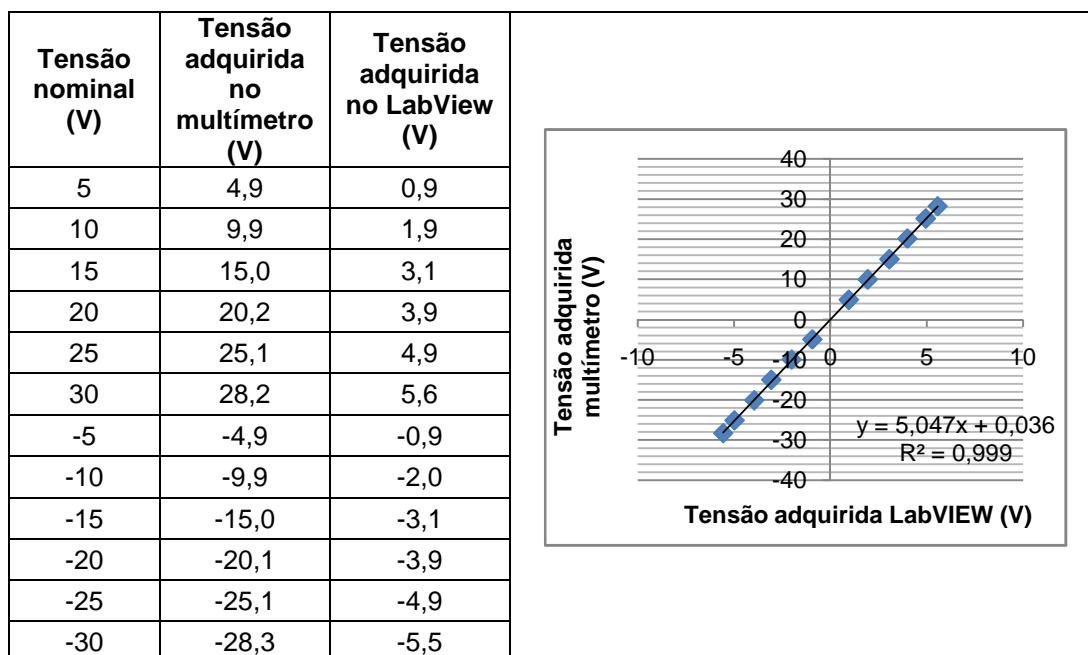


Tabela A 3.3 – Calibração para aquisição da corrente para fonte DIGITEC 600 – 2

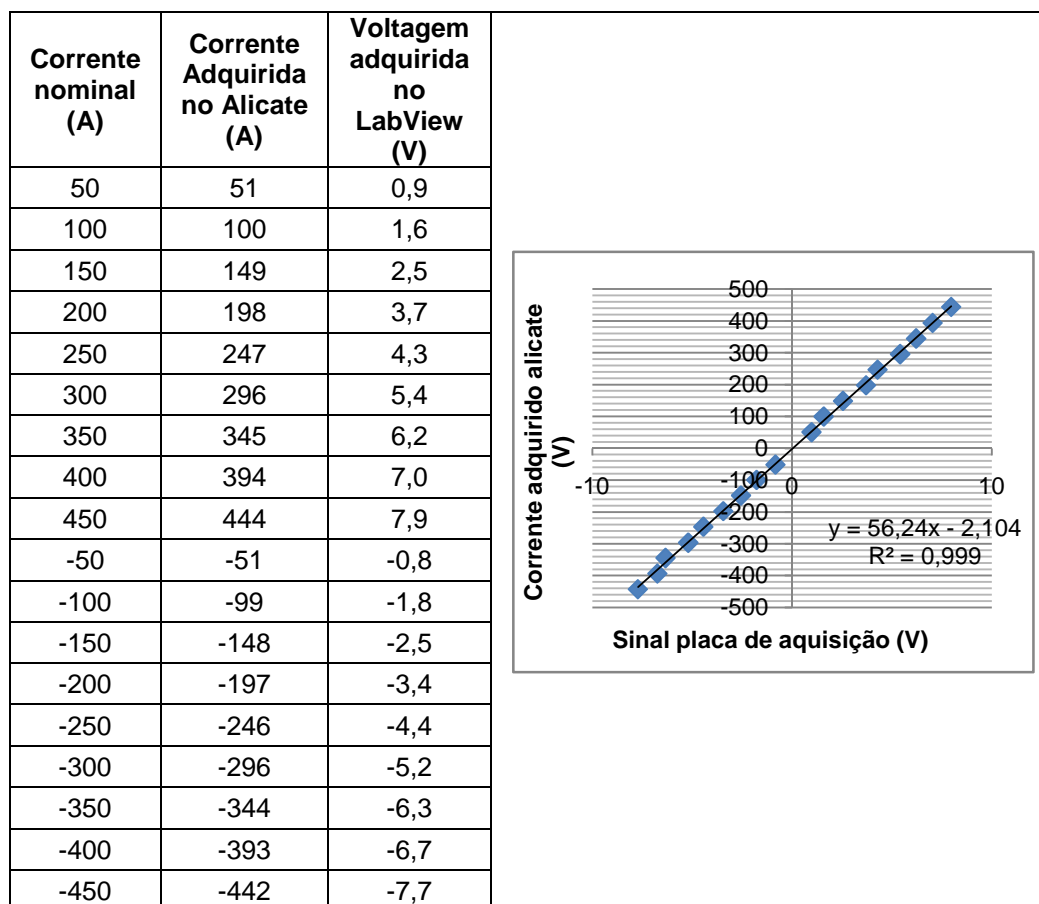


Tabela A 3.4 – Calibração para aquisição da tensão para fonte DIGITEC 600 – 2

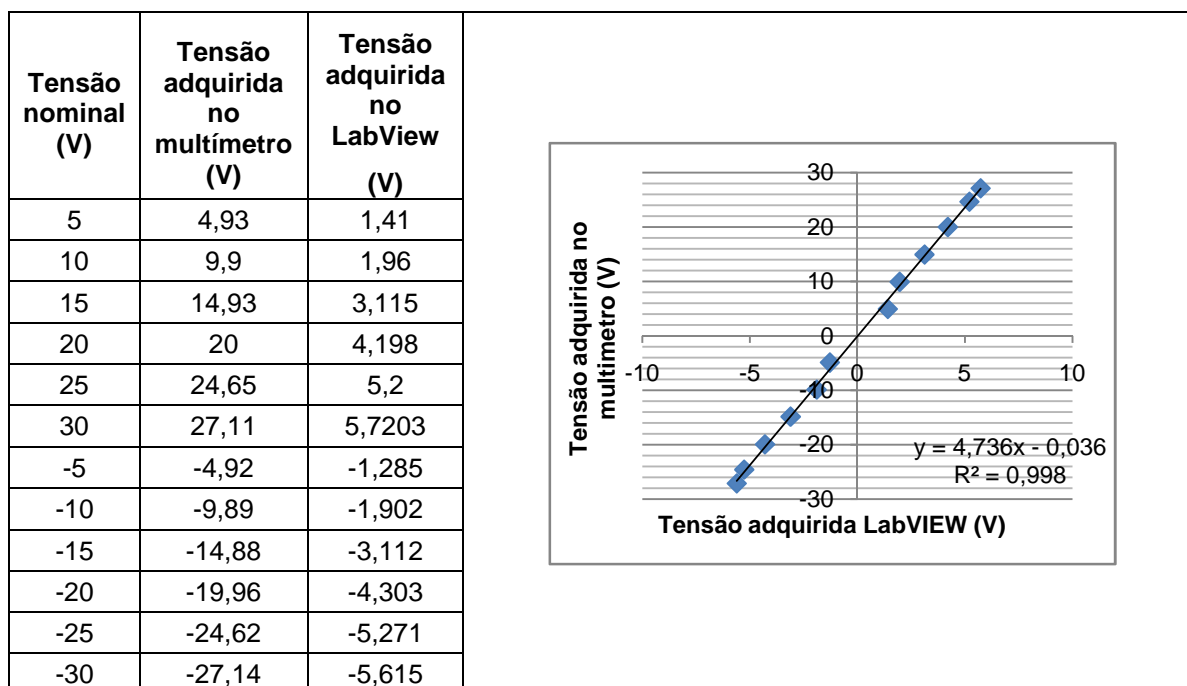


Tabela A 3.5 – Calibração da aquisição de corrente para caixinha com a fonte DIGITEC 600

– 1

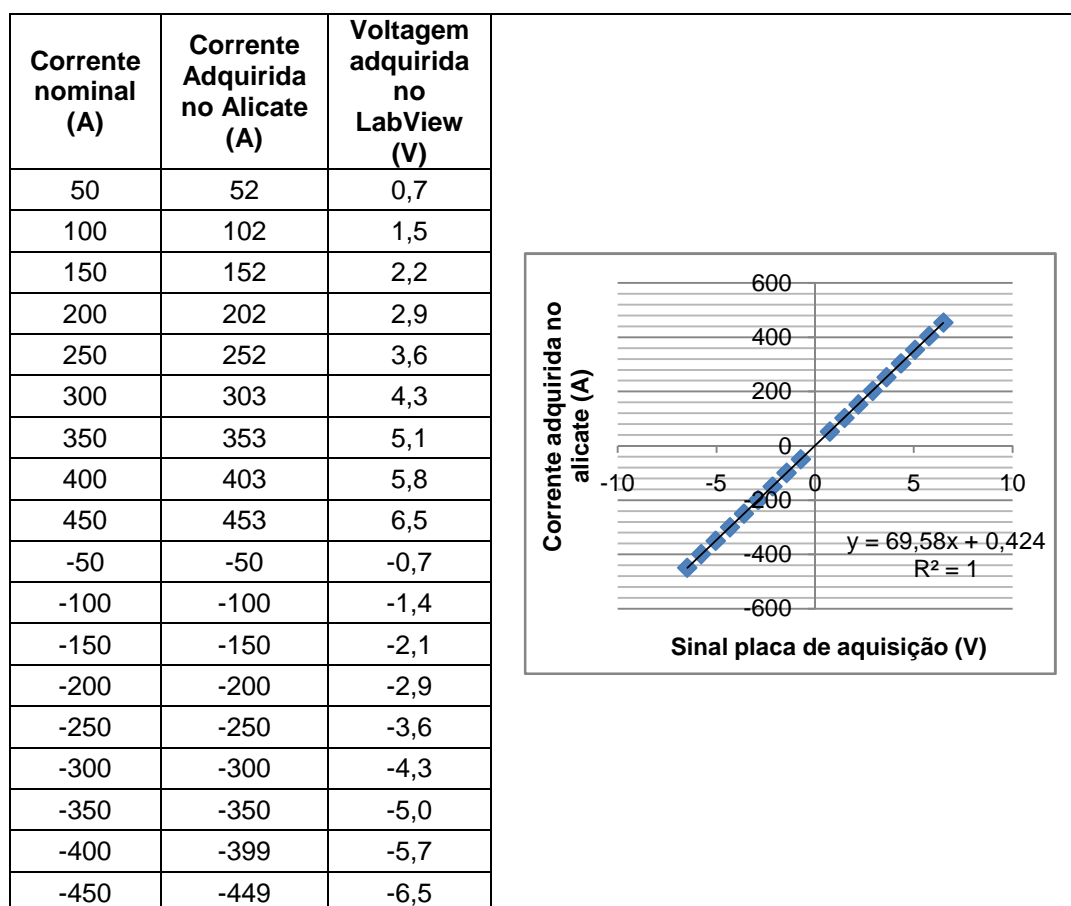
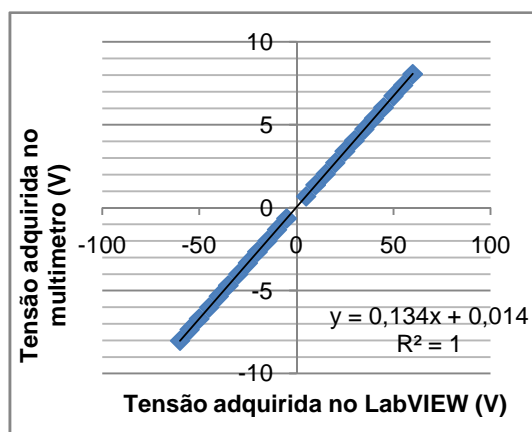


Tabela 3.6 - Calibração da aquisição da tensão com a fonte MINIPA

Tensão nominal (V)	Tensão adquirida no multímetro (V)	Tensão adquirida no LabVIEW (V)
5	5,07	0,69
10	10,15	1,37
15	15,02	2,03
20	20,04	2,71
25	25,08	3,39
30	30,01	4,06
35	34,92	4,72
40	39,90	5,39
45	44,76	6,05
50	49,78	6,73
55	54,60	7,38
60	59,56	8,05
-5	-4,84	-0,65
-10	-9,90	-1,34
-15	-14,79	-2,00
-20	-19,70	-2,66
-25	-24,74	-3,34
-30	-29,71	-4,01
-35	-34,63	-4,68
-40	-39,58	-5,35
-45	-44,53	-6,02
-50	-49,49	-6,69
-55	-54,42	-7,35
-60	-59,37	-8,02



## APÊNDICE IV

### CÁLCULO DAS VELOCIDADES DE SOLDAGEM PARA SOLDAGEM DE PASSES DE ENCHIMENTO

Tabela A 4.1 – Cálculo da velocidade de soldagem para soldagem de um passe de enchimento com processo de soldagem MIG/MAG DA P-CCC

	$V_s$ (mm/s)	$V_{a1 \text{ real}}$ (m/min)	$V_{a2 \text{ real}}$ (m/min)	$V_{a \text{ total}}$ (m/min)	$V_a/V_s$
<b>P-P</b>	7	9,7	4,62	14,3	0,49
	26,4				1,85
	44				3,08
	48,6				3,4
	53,5				3,7
<b>P-CCC</b>	7,2	9,7	5,03	14,73	
	27,2				
	45,3				
	50				
	55				

Tabela A 4.2 – Cálculo da velocidade de soldagem para soldagem de chapas finas em uma junta sobreposta na posição plana com processo de soldagem MIG/MAG DA P-CCC

	$V_s$ (mm/s)	$V_{a1 \text{ real}}$ (m/min)	$V_{a2 \text{ real}}$ (m/min)	$V_{a \text{ total}}$ (m/min)	$V_a/V_s$
<b>P-P</b>	30	9,7	6,3	16	1,875
	40				2,5
	50				3,125
	60				3,75
	65				3,7
	70				4,37
<b>P-CCC</b>	28,1	9,8	5,2	15	
	37,8				
	47,2				
	56,3				



Tabela A 4.3 – Cálculo da velocidade de soldagem para soldagem de um passe de enchimento na posição sobre cabeça sem uso da rampa de desaceleração da velocidade de alimentação com processo MIG/MAG DA P-CCC

	$V_s$ (mm/s)	$V_{a1 \text{ real}}$ (m/min)	$V_{a2 \text{ real}}$ (m/min)	$V_{a \text{ total}}$ (m/min)	$V_a/V_s$
<b>P-P</b>	11	9,5	6,5	16	0,69
	13				0,81
	16				1
	20				1,25
<b>P-CCC</b>	11,1	9,9	6,3	16,2	
	13,2				
	16,2				
	20,2				

## APÊNDICE V

### CÁLCULO DO MATERIAL DEPOSITADO NA SOLDAGEM DE PASSES DE ENCHIMENTO

O material depositado foi calculado com a equação apresentada abaixo:

$$Q_{depositado} = \frac{V_{a\ total} \times A \times \rho}{V_s} \quad (A\ 5.1)$$

Tabela A 5.1 – Cálculo do material depositado na soldagem de um passe de enchimento com processo P-P

$V_s$ (mm/s)	$V_{s\ real}$ (mm/s)	$V_{a\ total}$ (m/min)	Q (g/m)
7	7,2	14,3	311
26,4	25,5		82,5
44	42		49,5
48,6	46,4		44,8

Tabela A 5.2 – Cálculo do material depositado na soldagem de um passe de enchimento com processo P-CCC

$V_s$ (mm/s)	$V_{s\ real}$ (mm/s)	$V_{a\ total}$ (m/min)	Q (g/m)
7,2	7,4	14,73	311,1
27,2	26,2		81,7
45,3	43,3		50,3
50	47,7		45,3

Tabela A 5.3 – Cálculo do material depositado na soldagem de chapas finas em uma junta sobreposta na posição plana com processo P-P

$V_s$ (mm/s)	$V_{s\ real}$ (mm/s)	$V_{a\ total}$ (m/min)	Q (g/m)
30	28,8	16	80,9
40	38,2		61,6
50	47,7		48,9
60	57,1		40,5
65	61,8		37,3

Tabela A 5.4 – Cálculo do material depositado na soldagem de chapas finas em uma junta sobreposta na posição plana com processo P-CCC

$V_s$ (mm/s)	$V_{s \text{ real}}$ (mm/s)	$V_{a \text{ total}}$ (m/min)	$Q$ (g/m)
28,1	27,1	15	81,2
37,8	36,2		60,5
47,2	45,1		48,4
56,3	53,7		39,8

Tabela A 5.5 – Cálculo do material depositado na soldagem de um passe de enchimento na soldagem sobre cabeça com uso da rampa de desaceleração da velocidade de arame com processo P-CCC

$V_s$ (mm/s)	$V_{s \text{ real}}$ (mm/s)	$V_{a \text{ total}}$ (m/min)	$Q$ (g/m)
16,2	15,3	16,9	163,9
25	23,6		106,1
35	33		75,9

Tabela A 5.6 – Cálculo do material depositado na soldagem de um passe de enchimento na soldagem sobre cabeça com uso da rampa de desaceleração da velocidade de arame com processo P-P

$V_s$ (mm/s)	$V_{s \text{ real}}$ (mm/s)	$V_{a \text{ total}}$ (m/min)	$Q$ (g/m)
11	11	17,4	234,3
36	34,5		74,7
40	38,3		67,3
45	43		59,9

## APÊNDICE VI

### VALORES DO CÁLCULO DA GEOMETRIA DOS CORDÕES DE SOLDAS PASSE DE ENCHIMENTO

Tabela A 6.1 - Valores das medições da geometria dos cordões de soldas efetuados na soldagem de um passe de enchimento

Processo	V <sub>s</sub> (mm/s)	Área total do cordão (mm <sup>2</sup> )	Área do chanfro (mm <sup>2</sup> )	Área do reforço (mm <sup>2</sup> )	Área fundida (mm <sup>2</sup> )	ZAC (mm <sup>2</sup> )
P-P	7	58,2	31,4	7,0	19,8	89,3
	26,4	20,0			-	7,4
	44	9,9			-	6,0
P-CCC	7,2	51,0		10,9	8,7	77,6
	27,2	15,2			-	6,2
	45,3	8,6			-	6,1
Processo	V <sub>s</sub> (mm/s)	Largura (mm)	Penetração (mm)	Reforço (mm)		
P-P	7	16,0	1,9	1		
	26,4	11,4	1,8	-		
	44	6,0	1,0	-		
P-CCC	7,2	14,8	0,8	1,4		
	27,2	7,5	0,8	-		
	45,3	5,9	0,8	-		

Tabela A 6.2 - Valores das medições da geometria dos cordões de soldas efetuados na soldagem multi-passes na posição plana

Processo	V <sub>s</sub> (mm/s)	Área transversal (mm <sup>2</sup> )	ZAC (mm <sup>2</sup> )
P-P	7	190	77,5
P-CCC	7,2	190	67,0

Tabela A 6.3 - Valores das medições da geometria dos cordões de soldas efetuados na soldagem de um passe de enchimento sobrecabeça

Processo	$V_s$ (mm/s)	Área transversal (mm <sup>2</sup> )	ZAC (mm <sup>2</sup> )	Penetração (mm)	Largura (mm)
<b>P-P</b>	11,5	43,7	41,2	3,2	9,8
	13	40,7	38,5	2,6	9,7
	16	30,4	19,5	2,1	7,0
	20	23,0	17,2	1,3	7,3
<b>P-CCC</b>	13,2	32,8	30,1	2,7	9,0
	16,2	28,9	13,3	2,0	7,0
	21,2	23,1	12,5	1,1	7,3

Tabela A 6.4 - Valores das medições da geometria dos cordões de soldas efetuados na soldagem de um passe de enchimento sobrecabeça com uso da rampa de desaceleração da velocidade de arame

Processo	$V_s$ (mm/s)	Área transversal (mm <sup>2</sup> )	ZAC (mm <sup>2</sup> )	Penetração (mm)	Largura (mm)
<b>P-P</b>	11	45,2	44,1	2,4	10,9
	36	14,0	9,3	1,7	6,3
	40	12,1	6,0	1,5	6,0
	45	10,0	6,0	1,2	6,0
<b>P-CCC</b>	16,2	29,5	15,2	2,3	7,6
	25	19,2	12,9	1,7	7,8
	35	16,5	7,7	1,3	7,2

## APÊNDICE VII

### CÁLCULOS DA PORCENTAGEM DE RESPINGOS NA SOLDAGEM DE PASSES DE ENCHIMENTO

Tabela A 7.1 – Cálculos da porcentagem de respingos na soldagem de um passe de enchimento na posição plana

Processo	V <sub>s</sub> (mm/s)	Peso teórico (g)	Peso depois de soldagem (g)	Porcentagem de respingos (%)	Porcentagem Média (%)
P-P	7	56,2	46,2	18	13
	26,4	16,2	14,2	13	
	44	9,7	8,8	10	
	48,6	8,8	7,7	12	
P-CCC	7,2	54,7	49,7	9	8
	27,2	15,8	14,4	9	
	45,3	9,5	8,6	10	
	50	8,6	8,1	6	

Tabela A 7.2 – Cálculos da porcentagem de respingos na soldagem multipasse na posição plana

Processo	Passes	V <sub>s</sub> (mm/s)	Peso teórico (g)	Peso depois de soldagem (g)	Porcentagem de respingos (%)	Porcentagem Média (%)
P-P	Passe1	7	54,77	48,2	12	10
	Passe2			49,8	9	
	Passe 3			49,3	10	
	passse 4			48,9	11	
P-CCC	Passe1	7,2	54,79	49,86	9	8
	Passe2			50,74	7	
	Passe 3			50,49	8	
	passse 4			49,66	9	

Tabela A 7.3 – Cálculos da porcentagem de respingos na soldagem de chapa fina em junta sobreposta na posição plana

Processo	$V_s$ (mm/s)	Peso teórico (g)	Peso depois de soldagem (g)	Porcentagem de respingos (%)	Porcentagem Média (%)
<b>P-P</b>	30	17,2	15,6	9,4	11
	40	9,9	8,8	11,8	
	50	8,9	7,9	11,5	
	60	7,8	7,1	8,7	
	65	7,8	6,7	13,6	
<b>P-CCC</b>	28,1	14,9	13,9	6,5	8
	37,8	6,7	6,1	8,4	
	47,2	9,8	8,8	9,7	
	56,3	8,3	7,7	7,9	

Tabela A 7.4 – Cálculos da porcentagem de respingos na soldagem de um passe de enchimento na posição sobre cabeça

Processo	$V_s$ (mm/s)	Peso teórico (g)	Peso depois de soldagem (g)	Porcentagem de respingos (%)	Porcentagem Média (%)
<b>P-P</b>	11	40,2	36,1	10	11
	13	34,3	29,8	13	
	16	28,1	25,4	10	
	20	22,7	20,4	10	
<b>P-CCC</b>	13,2	34,4	31,5	8	9
	16,2	28,1	26,0	7	
	20,2	22,8	20,1	10	