

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
MECÂNICA**

Arthur Gondim Rodrigues

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA FLEXÍVEL DE
ALIMENTAÇÃO DINÂMICA APLICADO EM SOLDAGEM
MIG/MAG**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Régis Henrique Gonçalves e Silva

Florianópolis
2019

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do
Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Rodrigues, Arthur Gondim

Desenvolvimento de um sistema flexível de
alimentação dinâmica aplicado em soldagem MIG/MAG /
Arthur Gondim Rodrigues ; orientador, Regis
Henrique Gonçalves e Silva, 2019.
159 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de
Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós
Graduação em Engenharia Mecânica, Florianópolis, 2019.

Inclui referências.

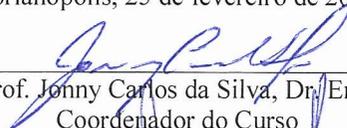
1. Engenharia Mecânica. 2. Controle eletromecânico
da transferência metálica. 3. Processo MIG/MAG
modificado. 4. Manufatura aditiva via arco e arame
(WAAM). 5. GMAW com retração de arame. I. Silva,
Regis Henrique Gonçalves e . II. Universidade
Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Mecânica. III. Título.

Arthur Gondim Rodrigues

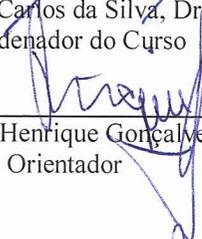
**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA FLEXÍVEL DE
ALIMENTAÇÃO DINÂMICA APLICADO EM SOLDAGEM
MIG/MAG**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de “Mestre em Engenharia Mecânica”, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Florianópolis, 25 de fevereiro de 2019.



Prof. Jonny Carlos da Silva, Dr. Eng.
Coordenador do Curso



Prof. Dr. Régis Henrique Gonçalves e Silva
Orientador

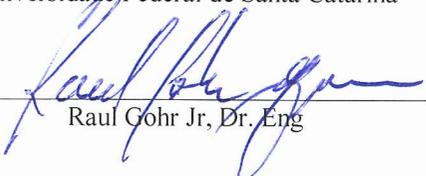
Banca Examinadora:



Prof. Régis Henrique Gonçalves e Silva, Dr. Eng. – Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina



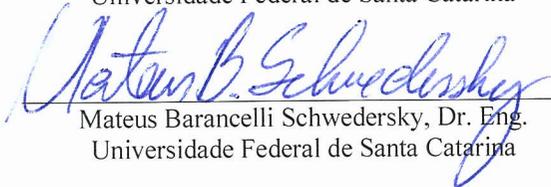
Prof. Milton Pereira, Dr. Eng.
Universidade Federal de Santa Catarina



Raul Gohr Jr, Dr. Eng



Prof. Carlos Alberto Martin, Dr. Eng
Universidade Federal de Santa Catarina



Mateus Barancelli Schwedersky, Dr. Eng.
Universidade Federal de Santa Catarina

AGRADECIMENTOS

Registro aqui meus sinceros agradecimentos às pessoas que tornaram possível a realização deste trabalho:

- Aos professores Régis Henrique Gonçalves e Silva e Mateus Barancelli Schwedersky pelos conhecimentos repassados.
- Ao Dr. Eng Cleber Marques pela co-orientação ao longo de todo desenvolvimento deste trabalho.
- Ao Dr. Eng. Raul Gohr Jr, juntamente com a equipe da IMC Soldagem, pelo apoio e fornecimento de equipamentos e conhecimento que possibilitaram os avanços, deste e de diversos outros trabalhos, focados ao desenvolvimento e aumento da competitividade da indústria nacional.
- Aos colegas que contribuíram diretamente para a realização deste trabalho: Fernando Costenaro, João Facco, Mário Cesar, Elias dos Santos Junior, Marcelo Okuyama, Cleber Guedes, Carolyn Kammers, Leandro Vaccari, Alexssander Marzzona e Tiago Calegari.
- Aos companheiros e ex-companheiros da equipe de eletrônica do LABSOLDA: Gustavo Souza, Felipe Kalil, Rafael Horn, Eduardo Luz, Douglas Ferronato, Victor José Pereira e Leonardo Aurélio Besen.
- Aos colegas de pós-graduação, pelo convívio e compartilhamento de ideias e experiências: Alberto Viviani, Alisson da Rosa, Arthur Gustavo, Daniel Galeazzi, Fernando Lucas, Francisco Sartori, Hellinton Direne, Junior Zanini, Kauê Riffel, Pedro Jaeger, Rafael Bernardi, Rafael Nunes, Ramon Fagundes, Rodrigo Nogueira, Thaffarel Barcelos e Uallas Henrique.
- Aos demais colegas e ex-integrantes do LABSOLDA pelo convívio diário e enriquecimento pessoal e profissional.
- Aos professores do Departamento de Automação e Sistemas da Universidade Federal de Santa Catarina.
- Ao programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina e CNPq.

Soldiers!
don't give yourselves to brutes - men who despise you - enslave
you - who regiment your lives - tell you what to do - what to
think and what to feel! Who drill you - diet you - treat you like
cattle, use you as cannon fodder.
Don't give yourselves to these unnatural men - machine men
with machine minds and machine hearts!
You are not machines!
You are not cattle!
You are men!
You have the love of humanity in your hearts!
You don't hate!
Only the unloved hate - the unloved and the unnatural!
Soldiers!
Don't fight for slavery!
Fight for liberty!
In the 17th Chapter of St Luke it is written: "the Kingdom of
God is within man" - not one man nor a group of men, but in
all men!
In you!
You, the people have the power!
The power to create machines.
The power to create happiness!
You, the people, have the power to make this life free and
beautiful, to make this life a wonderful adventure.
Then - in the name of democracy - let us use that power - let us
all unite.
Let us fight for a new world - a decent world that will give men
a chance to work - that will give youth a future and old age a
security.
By the promise of these things, brutes have risen to power.
But they lie!
They do not fulfil that promise.
They never will!
Dictators free themselves but they enslave the people!
Now let us fight to fulfil that promise!
Let us fight to free the world - to do away with national
barriers - to do away with greed, with hate and intolerance.
Let us fight for a world of reason, a world where science and
progress will lead to all men's happiness.
Soldiers!
in the name of democracy, let us all unite

(The Great Dictator - Charlie Chaplin)

RESUMO

O cenário tecnológico da indústria da soldagem brasileira tem se tornado cada vez mais dependente dos fabricantes multinacionais. No que tange ao processo MIG/MAG, as modernas versões dos equipamentos desses fabricantes permitem um alto nível de controle de diversas variáveis de processo. Dentre as inovações pode-se destacar o controle direto da movimentação de arame dentro de um período de transferência metálica, com alterações, inclusive, do sentido do movimento. A esse tipo de alimentação dá-se o nome de alimentação dinâmica (AD). A sincronização de parâmetros elétricos do arco com a movimentação do arame, na mesma frequência do destacamento, proporcionou aos processos modernos um aumento de estabilidade e controlabilidade. Em consequência, houve uma melhora da qualidade, produtividade e repetibilidade dos resultados. De modo a amenizar a perspectiva defasada da indústria nacional, e promover a liberdade ao usuário final para exploração da tecnologia, foi desenvolvido um sistema de soldagem MIG/MAG com alimentação dinâmica (MIG/MAG AD) com flexibilidade de regulagem de parâmetros pelo usuário (indústria ou P&D). O desenvolvimento do sistema partiu da concepção de uma tocha de soldagem equipada com um servomotor de alta dinâmica. Integrou-se este mecanismo com as estratégias de controle embarcadas no microcontrolador da fonte de soldagem e, assim, foi possível submeter o sistema a diversos ensaios de modo a avaliar os algoritmos criados e a operacionalidade do sistema como um todo. Foram estudadas técnicas e tecnologias de controle de velocidade e de deslocamento de arame que forneceram dados para que fossem confirmados o seguimento de referências estabelecidas pelo usuário. Foram avaliadas estratégias criadas visando modificar o perfil de movimentação de arame em um dado período de transferência, tais como inversão rápida no sentido de alimentação de arame, atrasos e mergulho de arame, estendendo a faixa de aplicações do sistema. Foram propostas e abordadas duas aplicações potenciais para o MIG/MAG AD: operações de revestimento e manufatura aditiva. Com relação ao procedimento voltado a operações de revestimento foi proposta a alternância de modos de transferência entre pulsado e curto-circuito, de modo a controlar a potência fornecida pelo processo. Esse estudo mostrou que a relação entre potência e períodos de transferência em corrente pulsada não é estritamente linear devido à presença de etapas de transição entre modos de transferência. Diante desse fato, o uso do protótipo, nesta aplicação, não se mostrou pertinente no estado atual de desenvolvimento. Já o estudo visando uso do

MIG/MAG AD como alternativa para manufatura aditiva, promovendo o mergulho intencional do arame na poça de fusão, se mostrou promissor para o controle térmico sobre o depósito, e conseqüente maior controlabilidade das características geométricas da estrutura a ser fabricada.

Palavras-chave: Controle eletromecânico da transferência metálica; Processo MIG/MAG modificado; Manufatura Aditiva via arco e arame (WAAM); GMAW com retração de arame.

ABSTRACT

The technological conjuncture concerning the Brazilian welding industry has become increasingly dependent on multinational manufacturers. Regarding the GMAW process, the modern versions of the equipment of these manufacturers allow a high level of control of several process variables. Among the innovations can be highlighted the direct control of the wire movement within the metallic transfer period, changing, even, the movement direction. This type movement is called dynamic wire feeding (DWF). The synchronization of arc's electric parameters with the movement of the wire, at the same frequency as the droplet detachment, has given the modern processes an increase of stability and controllability. As a consequence, there was an improvement in the quality, productivity and repeatability of the results. In order to mitigate the outdated prospect of the domestic industry and to promote freedom to the end user to exploit the technology, a GMAW welding system with dynamic feeding (GMAW DWF), with user parameter adjustment flexibility (industry or R & D), was developed. The developments initiated on the design of a welding torch equipped with a highly dynamic servomotor. This mechanism was integrated with the control strategies embedded in the power source's microcontroller and, thus, the system was submitted to several tests in order to evaluate the algorithms created and the operability of the system as a whole. Techniques and technologies of speed and wire displacement control were evaluated, which provided data to confirm the follow-up of references established by the user. Strategies were created to modify the wire movement profile in a given transfer period, such as fast inversion in the wire direction, delays and wire dipping, as means to extending the range of applications of the system. Two potential applications for the GMAW DWF were proposed and addressed: cladding operations and additive manufacturing. Regarding the procedure for cladding, it was proposed the alternation in the transfer modes between pulsed and short circuiting, in order to control the power supplied by the welding source. This study showed that the relationship between power and transfer periods in pulsed current is not strictly linear due to the presence of transition stages between transfer modes. Given this fact, the use of the prototype, in this application, was not relevant in the current state of development. However, the study aimed at the use of GMAW DWF as an alternative for additive manufacture, promoting the intentional dipping of the wire into the molten pool, was promising for the thermal control over the deposit, and

consequent greater controllability of the geometric characteristics of the structure to be manufactured.

Keywords: Electromechanical control of metallic transfer; Modified GMAW process; Wire + Arc Additive Manufacturing (WAAM); GMAW with wire retraction.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Esquemático para acessar aos vídeos a partir de <i>QR Codes</i>	25
Figura 2.1 - Evolução da tecnologia em equipamentos de soldagem MIG/MAG.....	28
Figura 2.2 – Fonte modelo TIG pop da empresa IMC Soldagem com regulagem de corrente por <i>shunt</i> magnético móvel.....	29
Figura 2.3 - Representação esquemática do funcionamento de uma fonte tiristorizada [3]......	30
Figura 2.4 - Representação do funcionamento de uma fonte transistorizada analógica [5]......	30
Figura 2.5 - Representação esquemática do funcionamento de uma fonte transistorizada chaveada no primário (inversora) [3]......	31
Figura 2.6 - Comparação entre a saída de uma fonte inversora e uma tiristorizada. Adaptado de [6]......	32
Figura 2.7 – IHM sem fio da fonte X8 da empresa Kemppi.	33
Figura 2.8 - Diagrama de modos de transferência metálica do processo MIG/MAG.....	34
Figura 2.9 - Representação da equivalência entre os volumes na transferência metálica [1]......	34
Figura 2.10 - Representação gráfica da frequência de transferência por velocidade de arame e diâmetro de gota.....	36
Figura 2.11 - Oscilogramas de tensão e corrente típicos para a transferência goticular projetada. Arame de aço carbono ER70S-6, processo em modo tensão constante, ajustada em 32,6 V e velocidade de aramé a 9 m/min.	37
Figura 2.12 – Oscilogramas de tensão e corrente típicos para a transferência por curto-circuito [16]......	39
Figura 2.13 - Taxa de fusão para dada corrente DC para o arame de aço carbono de 1,2 mm de diâmetro e proteção gasosa de Ar+5% CO ₂ . Adaptado de [13]......	40
Figura 2.14 - Forma de onda quadrada para corrente pulsada. Adaptado de [13]......	41
Figura 2.15 - Forma de onda do processo STT da empresa Lincoln Electric. Adaptado de [18]......	42
Figura 2.16- Movimento de avanço e recuo de arame para o CMT [1].	43
Figura 3.1 – Esquemático do equipamento CMT. Adaptado de [24]. ...	46
Figura 3.2 - Disposição de componentes básicos do sistema CMT. 1) Fonte de alimentação; 2) Cabeçote alimentador de arame 3) <i>Buffer</i> de aramé; 4) Tocha de soldagem. [1]	46

Figura 3.3 - Tochas equipadas com acionamentos voltadas à alimentação dinâmica. 1) Cloos MoTion Control Weld; 2) OTC Daihen Synchro feed [28]; 3) SKS microMIG [27].....	47
Figura 3.4 – Fronius <i>Robacta Drive</i> – Tocha CMT [29].....	48
Figura 3.5 – Diagrama esquemático do sistema de alimentação de arame.....	49
Figura 3.6 - <i>Buffer</i> presente no equipamento da empresa Fronius.	50
Figura 3.7 - <i>Buffer</i> presente no equipamento da empresa OTC Dahein [30].	50
Figura 3.8 - Oscilogramas idealizados exemplificando o funcionamento do processo CMT [1].	52
Figura 3.9- Comparativo entre taxas de deposição para o programa sinérgico CMT e soldagem pulsada utilizando arame Al 4043. Adaptado de [32].....	53
Figura 3.10 - Relação entre tensão média e corrente média para os processos pulsado, CMT e CMT+P. Linha sinérgica do arame 4043 1,2 mm de diâmetro. Adaptado de [10].....	54
Figura 3.11 - Oscilogramas exemplificando o funcionamento do processo CMT+P. Adaptado de [24].....	55
Figura 3.12 - Oscilogramas exemplificando o funcionamento do processo CMT <i>Advanced</i> . Adaptado de [24].	56
Figura 3.13 - Oscilogramas exemplificando o funcionamento do processo CMT <i>Pulse Advanced</i> . Adaptado de [24].....	57
Figura 3.14 – Três formatos de cabeça de pino produzidos pela variante CMT <i>Pin</i> [24].....	58
Figura 3.15- Oscilogramas exemplificando o funcionamento do processo CMT <i>Pin</i> . Adaptado de [24].....	58
Figura 3.16 – Peças com acabamento realizado pela variante	59
Figura 3.17- Oscilogramas exemplificando o funcionamento do processo CMT <i>Print</i> . Adaptado de [24].....	59
Figura 3.18 - Divisão do período de transferência e parâmetros principais.....	61
Figura 4.1 - Conjunto servoacionamento Kollmorgen. <i>Drive</i> AKDP00306NBCC-0; Motor AKM11B-AKMNC-00.	64
Figura 4.2 – Comparativo das dimensões dos servomotores utilizados nos experimentos: Panasonic (acima) e Kollmorgen (abaixo).	64
Figura 4.3 - Projeto mecânico do protótipo de tocha para o sistema MIG/MAG AD.....	65
Figura 4.4 – Protótipo de tocha adaptada para o sistema MIG/MAG AD, destacando os roletes tracionadores.	66

Figura 4.5 – Tela de configuração do tipo de acoplamento no software WorkBench.....	67
Figura 4.6 - Diagrama de blocos referente ao controle do servomotor.	68
Figura 4.7 - Resposta do servoacionamento ao degrau após o ajuste dos controladores, destacando o tempo de assentamento.	69
Figura 4.8 - Resposta do servoacionamento operando em modo de serviço em uma frequência de inversão de 100 Hz.	70
Figura 4.9 – Esquemático de um potenciômetro rotativo. Adaptado de [41].....	71
Figura 4.10 - Princípio de funcionamento dos sensores de Efeito Hall.	72
Figura 4.11 – Esquemático do funcionamento do mecanismo de medição. Posição relativa dos ímãs ao CI no estado inicial (A) e após o deslocamento da alavanca (B) e componentes do campo magnético. ...	74
Figura 4.12 - Instrumento projetado para medição de deslocamento angular.....	75
Figura 4.13 - Estrutura completa construída para o equipamento desacoplador.....	75
Figura 4.14 – Equipamentos para conversão AD na fonte de soldagem.	76
Figura 4.15 – Resultado da conversão AD	77
Figura 4.16 - Determinação da posição angular da alavanca presente no <i>buffer</i> . Na imagem é mostrada a posição considerada como a origem. .	78
Figura 4.17 - Resultado da conversão AD com relação à posição da alavanca.	78
Figura 4.18 - Resposta do sistema de controle projetado nas versões analógico e digital.	80
Figura 4.19 - Sinal de medição proveniente do mecanismo do <i>buffer</i> durante uma operação de soldagem e velocidade de arame do cabeçote.	81
Figura 4.20 – Máquina de estados do funcionamento geral.	82
Figura 4.21 - Máquina de estados da etapa de abertura.....	83
Figura 4.22 - Máquina de estados referente à etapa de soldagem.	84
Figura 4.23 - Máquina de estados referente à etapa de finalização.	85
Figura 5.1 - Fonte de soldagem DIGIPlus A7.....	88
Figura 5.2 - Dispositivos manipuladores utilizados. a) Tartilope V2F. b) Robô antropomórfico HP20.	88
Figura 5.3 - Sistema de aquisição de dados portátil (SAP V4) dedicado à soldagem.	89
Figura 5.4 - Bancada de ensaios e disposição dos equipamentos.	90

Figura 5.5 - Exemplo da utilização da ferramenta <i>track</i> do Motion Studio. Ponto utilizado como referência do centro do movimento em amarelo e para deslocamento angular em vermelho.	94
Figura 5.6 – Transformação de referência cartesiana realizada. A: Sistema cartesiano utilizado pelo Motion Studio; B: Sistema cartesiano utilizado no cálculo de deslocamento angular.	95
Figura 5.7 - Link de acesso aos vídeos da Etapa A.	95
Figura 5.8 – Perfil de velocidade de arame durante a transferência metálica referentes aos ensaios de A1 a A4.	96
Figura 5.9 - Detalhamento da pausa na movimentação do arame referente ao Ensaio A4.	98
Figura 5.10- Perfil de velocidade de arame durante a transferência metálica referentes aos ensaios de A5 a A7.	99
Figura 5.11 - Processo de medição com os <i>frames</i> extremos do movimento de recuo do arame: início (esquerda) e fim (direita).	101
Figura 5.12 – Resultado da medição de comprimento de arco para os ensaios da etapa B.	102
Figura 5.13 - Número de pulsos do sinal de <i>step</i> para o movimento de retorno do arame referente ao ensaio B3.	104
Figura 5.14 - Número de pulsos do sinal de <i>step</i> para o movimento de retorno do arame referente ao ensaio B1 (superior) e ao ensaio B4 (inferior).	106
Figura 5.15 - Trajetória executada pelo arame durante a etapa de curto-circuito.	108
Figura 5.16 – Metodologia de medição utilizando software Motion Studio. No exemplo é destacado o tempo morto (T_m) de recuo.	110
Figura 5.17 - Oscilogramas de corrente e tensão para o Ensaio C1 (acima) e Ensaio C2 (abaixo).	111
Figura 5.18 - Histogramas dos tempos de curto-circuito para o Ensaio C1 (esq.) e para o Ensaio C2 (dir.).	112
Figura 5.19 - Corrente e Velocidade do servomotor para o Ensaio C1 (acima) e para o Ensaio C2 (abaixo).	114
Figura 5.20 - <i>QR code</i> para acesso aos vídeos da Etapa D.	117
Figura 5.21 – Oscilogramas de tensão, corrente e velocidade de arame referentes aos ensaios D1, D2 e D3.	118
Figura 5.22 - Irregularidades na etapa de curto-circuito e ativação de proteções do sistema de controle, indicativo de <i>stopping</i>	120
Figura 5.23 - Sequência de quadros ilustrando o período de curto-circuito referente a um depósito de baixa energia. As setas indicam o sentido de movimento de arame.	121

Figura 5.24 – Sequência de quadros ilustrando o período de curto-circuito referente ao ensaio D1, alta energia.	121
Figura 5.25 - Histogramas do tempo de curto referentes aos ensaios da etapa D parte I	122
Figura 5.26 - Detalhamento do período de transferência relativo ao Ensaio D5.	126
Figura 6.1- Divisão do ciclo de soldagem, composto de 4 períodos, do processo AD-P na proporção 50%. Estão em destaque as etapas de transição.	131
Figura 6.2 - Esquemático do procedimento.....	132
Figura 6.3 - Oscilogramas de corrente, tensão e velocidade de arame para o Ensaio 1 (100% Pulsado).....	134
Figura 6.4 - Oscilogramas de corrente, tensão e velocidade de arame referente ao Ensaio 2 (0% Pulsado).....	135
Figura 6.5 - Detalhamento do período de transferência do processo MIG/MAG pulsado regulado.	136
Figura 6.6 - Oscilogramas de corrente, tensão e velocidade de arame referente ao Ensaio 3 (75% Pulsado).....	137
Figura 6.7 - Oscilogramas de corrente, tensão e velocidade de arame referente ao Ensaio 4 (50% Pulsado).....	137
Figura 6.8 - Oscilogramas de corrente, tensão e velocidade de arame referente ao Ensaio 5 (25% Pulsado).....	138
Figura 6.9. Secção transversal e aspecto superficial dos depósitos efetuados na posição vertical descendente.	139
Figura 6.10 - Médias da potência teórica e a medida em cada proporção do processo AD-P para o macroperíodo de 4 períodos de transferência.	142
Figura 6.11 - Oscilogramas de corrente e tensão do processo AD-P com macroperíodo igual a 40 períodos e proporção em 50% no modo pulsado.	143
Figura 6.12 - Comparação entre as médias da potência teórica calculada e a medida em cada proporção do processo AD-P para o macroperíodo composto por 40 períodos de transferência.	144
Figura 6.13 - Bancada de ensaios e disposição dos equipamentos para a filmagem termográfica.	148
Figura 6.14 – Imagens termográficas das faces posteriores de chapa nos instantes finais do procedimento.	150
Figura 6.15 – Perfis de temperatura das regiões demarcadas (traço vertical branco) na Figura 6.14.....	151
Figura 6.16 – Aspecto superficial e secção transversal dos cordões depositados.	153

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Parâmetros disponíveis ao usuário para regulagem.....	61
Tabela 4.1 - Valores nominais das especificações principais dos diferentes servomotores utilizados.	64
Tabela 5.1 - Etapas de avaliação das estratégias implementadas no desenvolvimento do processo MIG/MAG AD.....	87
Tabela 5.2 – Equipamentos integrantes do sistema de aquisição de imagens e dados de alta velocidade.....	91
Tabela 5.3 – Parâmetros de velocidade para os ensaios de avaliação do controle de velocidade (Etapa A).....	93
Tabela 5.4 – Parâmetros de soldagem utilizados em todos ensaios da Etapa A.....	93
Tabela 5.5 - Tempos médios de arco, curto-circuito, período e frequência de transferência.....	97
Tabela 5.6 - Parâmetros principais dos ensaios para avaliação do controle de deslocamento (Etapa B).....	100
Tabela 5.7 – Resultado de medição das amostras para cada ensaio da etapa B.....	103
Tabela 5.8 - Principais parâmetros para o ensaio de avaliação da inversão do movimento (Etapa C).....	109
Tabela 5.9 - Cálculo do atraso inercial a partir das imagens de alta velocidade.....	112
Tabela 5.10 - Atraso inercial e duração média da etapa de curto-circuito para os ensaios da Etapa C.	113
Tabela 5.11 - Ensaios para a Etapa D – Parte I, visando avaliar o fenômeno de mergulho do arame na poça de fusão.....	116
Tabela 5.12 - Parâmetros comuns a todos ensaios da Etapa D.....	116
Tabela 5.13 - Ensaios para a Etapa D – Parte II, visando avaliar o fenômeno de mergulho com atraso do arame na poça de fusão.	117
Tabela 5.14 – Valores médios para variáveis do processo, resultado dos ensaios da Etapa D – Parte I.....	117
Tabela 5.15 – Oscilogramas de tensão, corrente e velocidade de arame referentes aos ensaios da Etapa D – Parte II.....	123
Tabela 5.16 – Valores médios para variáveis do processo, resultado dos ensaios da Etapa B – Parte II.....	125
Tabela 6.1 – Especificações comuns a todos os ensaios.	132
Tabela 6.2 - Principais parâmetros dos processos.	133
Tabela 6.3- Matriz de ensaios para cordões individuais.....	133
Tabela 6.4. Dados das secções transversais dos depósitos.	138

Tabela 6.5 - Parâmetros elétricos médios dos ensaios para o processo AD-P.	140
Tabela 6.6 - Seção transversal dos depósitos efetuados na posição plana e respectivas diluições.	141
Tabela 6.7 - Potência média de cada etapa dos modos de transferência do MIG/MAG estudados.	142
Tabela 6.8 - Duração de cada etapa e percentual relativo às transições no macroperíodo total para os ensaios com macroperíodo de 4 períodos.	143
Tabela 6.9 - Duração de cada etapa e percentual relativo às transições no macroperíodo total para os ensaios com macroperíodo igual a 40 períodos.	144
Tabela 6.10 – Principais parâmetros do estudo utilizados em cada ensaio.	147
Tabela 6.11 – Parâmetros comuns a todos ensaios.	147
Tabela 6.12 – Parâmetros radiométricos para filmagem termográfica.	148
Tabela 6.13 – Valores médios para variáveis do processo.	151

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AC	-	<i>Alternating Current</i>
AD	-	<i>Alimentação Dinâmica</i>
AR	-	<i>Augmented Reality</i>
ARM	-	<i>Advanced RISC Machine</i>
AWP	-	<i>Active Wire Process</i>
CAD	-	<i>Computer-aided design</i>
CCC	-	<i>Curto-circuito Controlado</i>
CI	-	<i>Circuito Integrado</i>
CMT	-	<i>Cold Metal Transfer</i>
CMT <i>adv</i>	-	<i>CMT Advanced</i>
CMT+P	-	<i>CMT Pulse</i>
CMT+P <i>adv</i>	-	<i>CMT Pulse Advanced</i>
CRA	-	<i>Corrosion Resistant Alloys</i>
DC	-	<i>Direct Current</i>
<i>Fps</i>	-	<i>Frames per second</i>
IHM	-	<i>Interface Homem-Máquina</i>
LABSOLDA	-	<i>Instituto de Soldagem e Mecatrônica</i>
MAG	-	<i>Metal Active Gas</i>
MIG	-	<i>Metal Inert Gas</i>
P	-	<i>Proporcional</i>
PC	-	<i>Personal Computer</i>
PI	-	<i>Proporcional integral</i>
P&D	-	<i>Pesquisa e Desenvolvimento</i>
QR <i>Code</i>	-	<i>Quick Response Code</i>
RMD	-	<i>Regulated Metal Deposition</i>
SAP	-	<i>Sistema de Aquisição de Dados Portátil</i>
SFD	-	<i>Smart Feedback Device</i>
SRC	-	<i>Silicon Controlled Rectifier</i>
STT	-	<i>Surface Tension Transfer</i>
TIG	-	<i>Tungsten Inert Gas</i>
UFSC	-	<i>Universidade Federal de Santa Catarina</i>
VR	-	<i>Virtual Reality</i>
WAAM	-	<i>Wire Arc Additive Manufacturing</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

Ar	- Argônio
B	- Densidade de fluxo magnético
B _x	- Componente do vetor de fluxo magnético na direção horizontal
B _y	- Componente do vetor de fluxo magnético na direção vertical
cArc	- Comprimento de arco
CO ₂	- Gás Carbônico
d _e	- Diâmetro do eletrodo
d _g	- Diâmetro de gota
d%	- Taxa de diluição
f	- Frequência
h	- Altura indicada
I _b	- Corrente de Base (Pulsado)
I _{ba}	- Corrente de base no arco (MIG/MAG AD)
I _c	- Corrente de curto (MIG/MAG AD)
I _m	- Corrente Média
I _p	- Corrente de Pulso (Pulsado)
I _{pa}	- Corrente de pulso no arco (MIG/MAG AD)
I _{pc}	- Corrente de pulso no curto
nAD	- N° de períodos do processo MIG/MAG-AD
nPul	- N° de períodos do processo pulsado
rp	- Relação de passos
T	- Período
T _m	- Tempo morto (atraso inercial)
tpa	- Tempo de pulso no arco (MIG/MAG AD)
tpc	- Tempo de pulso no curto (MIG/MAG AD)
T _s	- Período de amostragem
V _a	- Velocidade de arame
V _{ab}	- Velocidade de avanço de arame na base
V _{ap}	- Velocidade de avanço de arame no pulso
V _{cil}	- Volume do cilindro
V _{esf}	- Volume da esfera
V _{in}	- Velocidade de entrada
V _{out}	- Velocidade de saída
V _r	- Velocidade de recuo de arame
σ	- Desvio padrão
Θ _f	- Ângulo no frame

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	23
1.1	Objetivos	24
1.1.1	Objetivo Geral	24
1.1.2	Objetivos Específicos	24
1.2	Subsídio à Leitura.....	25
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	27
2.1	Histórico da Tecnologia em Equipamentos de Soldagem MIG/MAG.....	27
2.2	Modos de Transferência Metálica do MIG/MAG	33
2.2.1	Transferência Goticular Projetada - Spray	36
2.2.2	Transferência por Curto-Circuito – MIG/MAG	38
2.2.3	Controle dos Modos de Transferência.....	40
3	ALIMENTAÇÃO DINÂMICA: EQUIPAMENTOS, VERSÕES E DEFINIÇÕES DO MIG/MAG AD.....	45
3.1	Equipamentos	45
3.1.1	Tocha.....	47
3.1.2	<i>Buffer</i>	48
3.2	Versões	51
3.2.1	CMT	51
3.2.2	CMT <i>Pulse</i> (CMT+P).....	53
3.2.3	CMT <i>Advanced</i> (CMT <i>adv</i>)	55
3.2.4	CMT <i>Pulse Advanced</i> (CMT+P <i>adv</i>)	56
3.2.5	CMT <i>Pin</i> e CMT <i>Print</i>	57
3.3	Definição de Requisitos do MIG/MAG AD.....	60
4	DESENVOLVIMENTO DO PROCESSO	63
4.1	Desenvolvimento da Tocha	63
4.1.1	Projeto e Construção do Protótipo.....	63
4.1.2	Sintonia do Controle do Servomotor	66
4.2	Desenvolvimento do <i>Buffer</i>	70
4.2.1	Mecanismos de Medição de Deslocamento Angular	70
4.2.2	Projeto do Mecanismo de Medição	73
4.2.3	Tratamento de sinais e Definição do Sistema de Controle ..	75
4.3	Desenvolvimento do Software de Controle do Processo.....	81
5	EQUIPAMENTOS E ENSAIOS DE AVALIAÇÃO DO PROTÓTIPO	87
5.1	Equipamentos	87
5.1.1	Fonte de soldagem.....	87
5.1.2	Dispositivos Manipuladores	88
5.1.3	Dispositivos de Medição e Monitoramento.....	89

5.2	Ensaio de Avaliação do Protótipo	92
5.2.1	Etapa A - Controle de Velocidade de Arame	92
5.2.2	Etapa B - Controle de Deslocamento	100
5.2.3	Etapa C - Estratégia de Inversão	107
5.2.4	Etapa D - Estratégia de Mergulho de Arame	115
6	APLICAÇÕES DO PROTÓTIPO	129
6.1	Revestimento Metálico Vertical Utilizando o Processo AD-P 129	
6.1.1	Metodologia	130
6.1.2	Resultados e Discussões.....	134
6.1.3	Conclusões	145
6.2	Exploração da Técnica de Mergulho Visando Operações de Manufatura Aditiva	146
6.2.1	Metodologia	146
6.2.1	Resultados e Discussões.....	149
6.2.2	Conclusões	152
7	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	155
7.1	Conclusões	155
7.2	Sugestões para Trabalhos Futuros.....	156

1 INTRODUÇÃO

No campo de maquinário de soldagem, a indústria brasileira ainda é impotente frente aos equipamentos de grandes fabricantes estrangeiros. Dessa forma, o produto de alta tecnologia fornecido por estes fabricantes não encontra barreiras comerciais na indústria nacional. Não somente os custos relacionados à manutenção e consumíveis são atrelados aos próprios fabricantes, mas também a assistência tecnológica associada e a própria disponibilização de peças, fazendo o mercado nacional totalmente dependente do mercado internacional.

Além dos fatores econômicos citados, a utilização desses equipamentos fica limitada à gama de aplicações pré-determinadas pelos fabricantes. Estes fornecem os chamados programas sinérgicos, que ajustam de forma automática todos os parâmetros envolvidos no processo a partir de algumas condições de entrada inseridas pelo usuário. Dessa forma existe certa restrição à exploração do real potencial daquela tecnologia.

Seguindo os princípios do Instituto de Soldagem e Mecatrônica da UFSC, o LABSOLDA, o presente trabalho se caracteriza como contribuição ao desenvolvimento da indústria da soldagem nacional. Promovendo a liberdade e flexibilidade de manipulação de princípios de controle dos processos, tornando possível a compreensão dos fenômenos físicos envolvidos, o que, por sua vez, é base indispensável para evolução e inovação tecnológica. É com este panorama que países desenvolvidos fazem fortes investimentos de P&D no campo da soldagem, contribuindo para o desenvolvimento de novos processos ou versões, na constante busca por melhorias na qualidade e produtividade [1].

Neste contexto, o trabalho trata da tecnologia da soldagem MIG/MAG com controle eletromecânico da transferência metálica, que representa o estado-da-arte neste processo. Esta variante permite a expansão da faixa de aplicação e das condições de aplicação do processo MIG/MAG, aumento de estabilidade e controlabilidade do processo e, conseqüentemente, da qualidade e produtividade dos resultados obtidos, o habilitando inclusive para aplicações não convencionais, como Manufatura Aditiva (Impressão 3D), soldagem de pinos e impressão em relevo.

Os principais subsistemas que materializam o processo são a tocha (promovendo o acionamento dinâmico do arame), o cabeçote alimentador (que fornece material de forma contínua), um dispositivo intermediário para sincronização da alimentação de arame entre cabeçote e tocha, as

formas de onda que se sincronizam ao acionamento mecatrônico e as lógicas e algoritmos de controle. O desenvolvimento integrado e sincronizado do sistema compreende não apenas o entendimento dos efeitos e fenômenos da transferência metálica, como também o comportamento dos componentes frente aos requisitos impostos pelas condições presentes na soldagem MIG/MAG, justificando os objetivos técnicos estipulados.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral do trabalho é a consolidação de um sistema destinado à soldagem MIG/MAG com alimentação dinâmica com total flexibilidade de regulação dos parâmetros influentes no processo pelo usuário.

1.1.2 Objetivos Específicos

Para se atingir o objetivo geral proposto foram elencados os seguintes objetivos específicos:

- Desenvolver e avaliar estratégias de controle que atendam às necessidades do processo de acordo com a aplicação.
- Desenvolvimento de uma solução para o sistema de alimentação de arame, utilizando-se de um dispositivo desacoplador (*buffer*) entre a tocha e a alimentação secundária, de modo que não haja sobra ou excesso de arame no sistema ao executar um procedimento de soldagem;
- Implementação de diferentes formas de onda de corrente e/ou movimento de arame de forma a ampliar o escopo de aplicações do equipamento em desenvolvimento;
- Avaliar a utilização do sistema concebido em diferentes aplicações de soldagem;
- Avaliar o comportamento do equipamento em operação bem como a qualidade do depósito.

1.2 SUBSÍDIO À LEITURA

Com a intenção de favorecer a compreensão e aproximar o leitor a este trabalho foi criado um canal na plataforma de vídeo YouTube, no qual foi realizado o upload dos vídeos utilizados como subsídio para os estudos. Para direcionar o leitor aos vídeos foram utilizados *QR codes* contendo o link para os mesmos. Para acessar basta escanear o *QR code* utilizando um aplicativo apropriado para smartphone, conforme ilustrado na Figura 1.1. Na versão digital deste documento ainda é possível clicar sobre a imagem do *QR code* para que seja redirecionado ao vídeo correspondente.

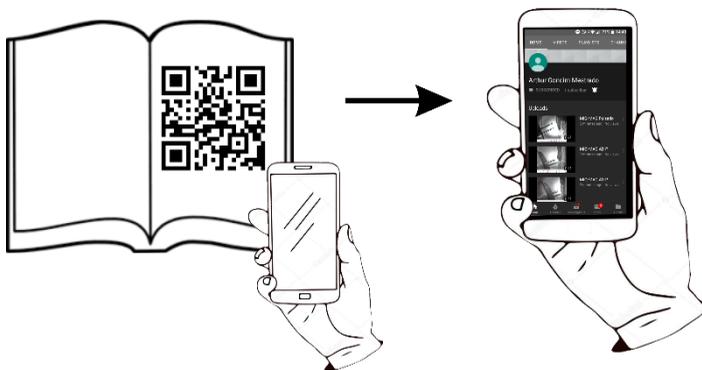


Figura 1.1 - Esquemático para acessar aos vídeos a partir de *QR Codes*.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 HISTÓRICO DA TECNOLOGIA EM EQUIPAMENTOS DE SOLDAGEM MIG/MAG

Desde seu advento, na década de 40, os princípios básicos do processo MIG/MAG permanecem. Não obstante, avanços obtidos de desenvolvimento tecnológico e científico em campos de conhecimento conexos, como física do plasma, materiais, eletroeletrônica, magnetismo, hidrodinâmica, etc. têm subsidiado o aprimoramento do processo.

A Figura 2.1 apresenta os fatos marcantes, dispostos em ordem cronológica, direcionados aos equipamentos de soldagem MIG/MAG.

O surgimento do processo MIG/MAG data de 1948, desenvolvido no Battelle Memorial Institute por H. E. Kennedy. Esse desenvolvimento evoluiu a partir do processo TIG, substituindo o eletrodo de tungstênio por um eletrodo continuamente alimentado de pequeno diâmetro. Por volta de 1958 foi introduzido o CO_2 como gás de proteção, o que possibilitou o surgimento da versão do processo com transferência por curto-circuito. Essa variação viabilizou a soldagem em todas as posições e soldagem de chapas finas, logo se tornando a versão mais popular do processo MIG/MAG [2].

Até meados de 1969 as fontes de energia utilizadas para os processos de soldagem a arco são denominadas fontes convencionais. Estas fontes forneciam a potência elétrica ao arco por meio de um controle baseado em efeitos eletromagnéticos, tais como variação da indutância, transformadores de regulação por *shunt*, ferro ou bobina móvel. Um exemplo de fonte convencional com regulação por *shunt*-móvel é apresentado na Figura 2.2 juntamente com o diagrama do funcionamento do mecanismo. Nesse grupo de fontes se enquadram as do tipo moto-gerador, transformador e transformador-retificador [3].

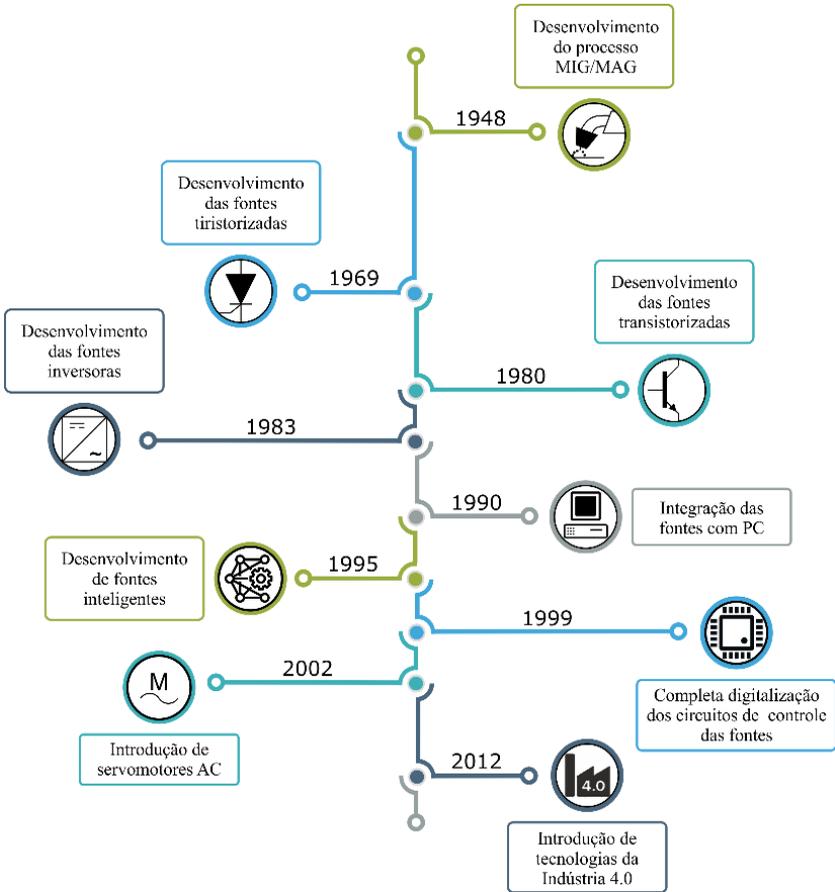


Figura 2.1 - Evolução da tecnologia em equipamentos de soldagem MIG/MAG.

Os avanços na eletrônica de potência viabilizaram o surgimento de um novo grupo de fontes, nomeadas de fontes modernas ou eletrônicas. Nesse grupo se encontram as fontes tiristorizadas, as transistorizadas analógicas e as transistorizadas chaveadas.

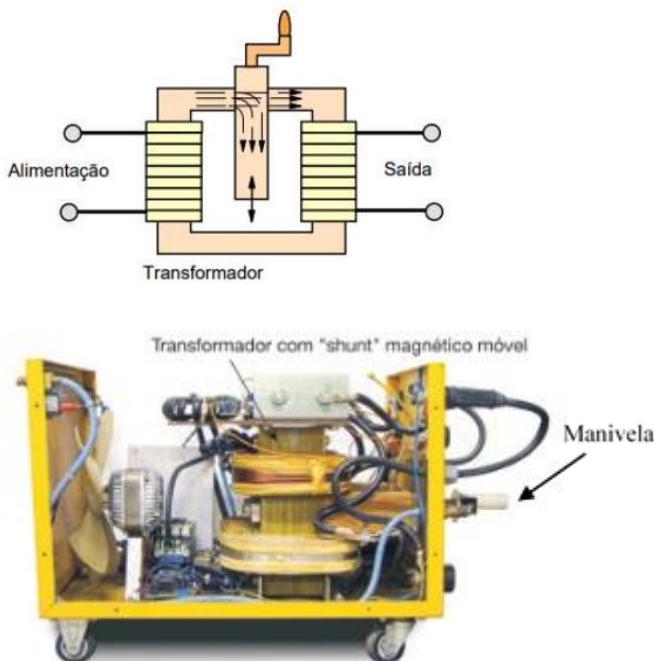


Figura 2.2 – Fonte modelo TIG pop da empresa IMC Soldagem com regulação de corrente por *shunt* magnético móvel.

O primeiro tipo de fontes desse grupo, as chamadas tiristorizadas, foram concebidas em 1969. Os tiristores, ou SCR (*Silicon Controlled Rectifier*), podem ser considerados como um tipo de diodo chaveado, iniciando a condução a partir do recebimento de um sinal em seu terminal de *gate*. Uma vez disparado, o tiristor conduz até que a corrente se anule ou inverta o sentido. Como consequência, o momento do disparo do gatilho só pode ser regulado a cada meio ciclo [3], conforme o esquemático da Figura 2.3. Esta limitação faz com que haja uma resposta lenta e um ruído de baixa frequência na saída da fonte [4].

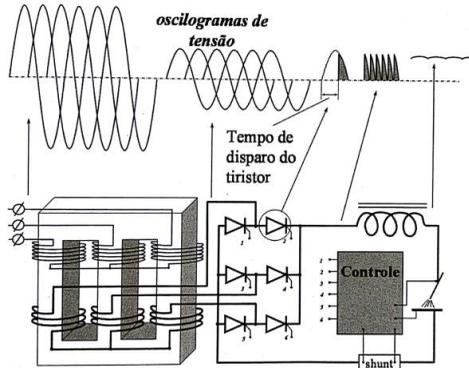


Figura 2.3 - Representação esquemática do funcionamento de uma fonte tiristorizada [3].

O segundo exemplar do grupo das fontes modernas são as fontes transistorizadas analógicas. Estas foram as primeiras fontes transistorizadas produzidas. O diagrama representando o funcionamento de uma fonte transistorizada analógica é apresentado na Figura 2.4. Esse tipo de equipamento funciona com os transistores operando em sua região linear. Este fato traz os benefícios de a saída ser praticamente isenta de ruídos e sua capacidade de reagir de forma muito rápida [4], o que a torna adequada para trabalhos de pesquisa. Em contrapartida, existe uma dissipação de potência elevada nos transistores, fazendo que haja a necessidade de se construir um sistema de refrigeração a água, apresentando índices de rendimento extremamente baixos, não ultrapassando os 60% [5].

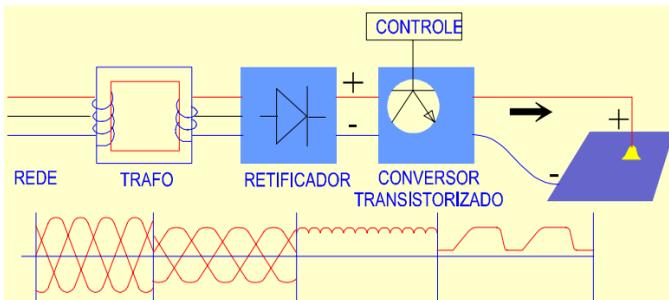


Figura 2.4 - Representação do funcionamento de uma fonte transistorizada analógica [5].

O terceiro tipo de fonte moderna são as transistorizadas chaveadas. O funcionamento das fontes chaveadas se baseia na utilização do transistor como uma chave, com o intuito de diminuir as perdas no elemento semiconductor e aumentar o rendimento energético [5]. O chaveamento pode ser no primário do transformador, o que deu origem à denominação popular de inversora, ou no secundário. O esquemático do funcionamento de uma fonte transistorizada inversora pode ser visualizado na Figura 2.5.

As fontes chaveadas operam em uma elevada frequência de chaveamento (5 a 200 kHz) de forma que um transformador de pequenas dimensões é capaz de reduzir a tensão de forma eficiente [4]. Como o transformador é um dos elementos mais pesados e maiores em uma fonte de soldagem, as dimensões das fontes inversoras puderam ser drasticamente reduzidas.

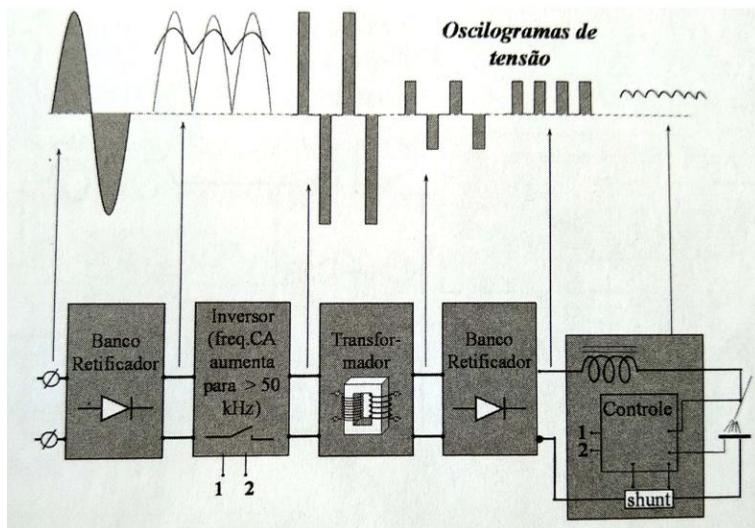


Figura 2.5 - Representação esquemática do funcionamento de uma fonte transistorizada chaveada no primário (inversora) [3].

Além das vantagens de menores dimensões e maiores níveis de rendimento, as fontes inversoras apresentam uma rápida resposta do sistema de controle. A fim de comparar a resposta de uma fonte inversora e de uma fonte tiristorizada, Byrd [6] conduziu ensaios observando a corrente na saída de cada fonte quando ajustada a corrente de referência em 100 A. O resultado deste experimento é apresentado na Figura 2.6.

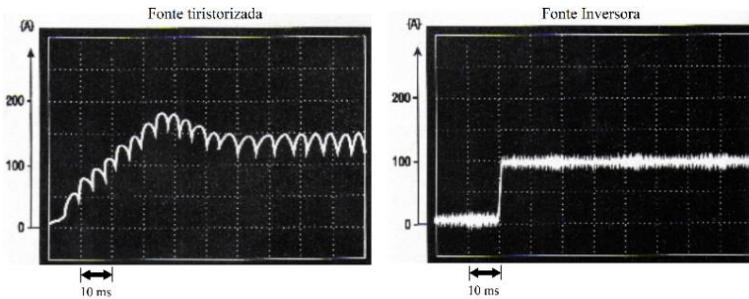


Figura 2.6 - Comparação entre a saída de uma fonte inversora e uma tiristorizada. Adaptado de [6].

O progresso subsequente nas fontes de energia para soldagem foi obtido pela integração do sistema de controle da fonte com um PC. Em 1990 foram desenvolvidas fontes equipadas com essa integração, o que permitiu a incorporação de técnicas de controle compensatório, atingindo alta performance e eficácia do equipamento [7]. Em 1995, foram desenvolvidas fontes de energia de soldagem inteligentes, equipadas com lógicas de controle Fuzzy e ajuste automático de ponto de operação ótimo.

No ano de 1999, fontes de energia de soldagem começaram a ser, de fato, digitalmente controladas. A maioria dos circuitos de controle foram alterados de analógico para digital, tornando possível melhorar a reprodutibilidade das condições de soldagem [7].

Até o início dos anos 2000 os avanços em equipamento de soldagem eram voltados, principalmente, ao campo eletroeletrônico das fontes de soldagem. Em 2002, entretanto, surgiu comercialmente o primeiro equipamento dotado de um servomotor adicional no sistema de alimentação de arame [8]. Este equipamento introduziu o controle eletromecânico no campo da soldagem e permitiu a abertura de uma nova gama de possibilidades para a inovação de processos e, conseqüentemente, aplicações. Anteriormente a esta inovação, os sistemas de alimentação de arame dos equipamentos de soldagem MIG/MAG eram constituídos meramente por um motor DC, promovendo a alimentação de arame a uma velocidade constante. Já os servomotores, integrados aos sistemas digitais microcontrolados das fontes, possibilitam implementar trajetórias de arame em diferentes perfis de velocidade.

Em 2011, foi apresentado em uma feira em Hannover o termo “Indústria 4.0” [9]. Em 2012 um grupo de trabalho apresentou um conjunto de recomendações para implementação da Indústria 4.0 ao

governo alemão e desde lá surgiram diversos dispositivos com algum tipo de inteligência embarcada. Em sistemas e equipamentos dedicados à soldagem esta tendência também vem se fazendo presente. As maiores iniciativas de pesquisa são nas áreas de comunicação com e sem fio, Figura 2.7, sistemas de supervisão e armazenamento de dados com vistas a funções de rastreabilidade [10]. Estas soluções são encontradas em equipamento de soldagem na forma de produtos como geradores de trajetórias para robôs em ambiente de realidade virtual (VR) e realidade aumentada (AR), banco de dados em nuvem com informações detalhadas dos processos das plantas a nível de máquina (*Big Data*), além de soluções em processos avançados com uso de inteligência artificial [11] [12].



Figura 2.7 – IHM sem fio da fonte X8 da empresa Kemppi.

2.2 MODOS DE TRANSFERÊNCIA METÁLICA DO MIG/MAG

O processo MIG/MAG é caracterizado, primordialmente, pela alimentação contínua de arame-eletrodo e sua passagem para a poça de fusão por meio de um arco elétrico. Esta passagem é denominada transferência metálica e se dá pela interação de um conjunto de forças sobre a extremidade fundida do eletrodo, poça de fusão e arco voltaico [3]. Dentre as forças que governam o modo de transferência metálica merecem destaque as forças de origem eletromagnética, gravitacional e tensão superficial. O modo em que se dá essa transferência é determinado pelo arranjo resultante dessas forças. O modo de transferência, por sua vez, tem grande influência sobre a estabilidade do processo e afeta fortemente a quantidade de respingos gerada, a possibilidade da soldagem

em várias posições, a qualidade/geometria da solda e a aparência superficial do cordão de solda [3].

Essencialmente, a transferência metálica se dá por dois meios: por contato ou por voo livre. No primeiro há o contato físico entre gota e poça de fusão antes de seu destacamento. No segundo meio a gota se destaca sem haver contato com a poça de fusão. Scotti e Ponomarev [3] dividem os modos de transferência naturais de acordo com o diagrama da Figura 2.8.

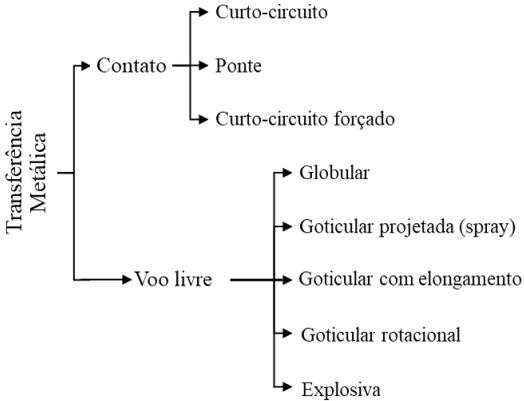


Figura 2.8 - Diagrama de modos de transferência metálica do processo MIG/MAG.

Independentemente do modo de transferência, pode-se considerar que, a cada período de transferência, uma porção cilíndrica do arame é transformada em uma gota de material fundido que é depositado sobre a peça. Desprezando perdas relacionadas à vaporização do metal ou respingos, é possível considerar que o volume definido por esse cilindro de arame é igual ao volume da gota, comumente idealizada para uma esfera, como está representado na Figura 2.9.



Figura 2.9 - Representação da equivalência entre os volumes na transferência metálica [1].

A equação que rege o comportamento da frequência de transferência em função da velocidade de arame pode ser obtida a partir da relação entre a porção cilíndrica do arame e a esfera de metal fundido. Igualando as equações do volume de ambas geometrias se obtém a Equação 2.1.

$$V_{cil} = V_{esf}$$

$$h \cdot \pi \cdot \left(\frac{d_e}{2}\right)^2 = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot \left(\frac{d_g}{2}\right)^3 \quad 2.1$$

A Equação 1.2 mostra que a variação da altura do cilindro consumido é consequência da velocidade de alimentação de arame (V_A) e do período de transferência (T), ou inverso da frequência de transferência (f).

$$h = V_A \cdot T = \frac{V_A}{f} \quad 2.2$$

Substituindo a Equação 2.2 na Equação 2.1 e adequando as unidades para o que comumente usa-se em procedimentos de soldagem, tem-se a Equação 2.3, que define o comportamento da frequência de transferência em função do diâmetro de gotas, diâmetro do eletrodo e da velocidade de arame.

$$f = \frac{V_A \cdot d_e^2}{d_g^3} \cdot 25 \quad 2.3$$

Onde:

f = Frequência de transferência [Hz],

V_A = Velocidade de arame [m/min],

d_e = Diâmetro do eletrodo [mm],

d_g = Diâmetro da gota [mm].

A representação gráfica da Equação 2.3 é mostrada na Figura 2.10. De maneira geral, a literatura cita que, para uma boa operacionalidade do processo, o diâmetro de gota deve assumir valores próximos ao diâmetro do arame [3]. Utilizando-se dessa premissa, são destacados dois pontos na figura representando situações comumente empregadas em soldagem,

com o arame de 1,2 mm de diâmetro, velocidades de alimentação 5 m/min, para o primeiro ponto, e 8 m/min para o segundo ponto. Esse ajuste resulta em frequências de transferência de 104,2 Hz e 166,7 Hz, respectivamente.

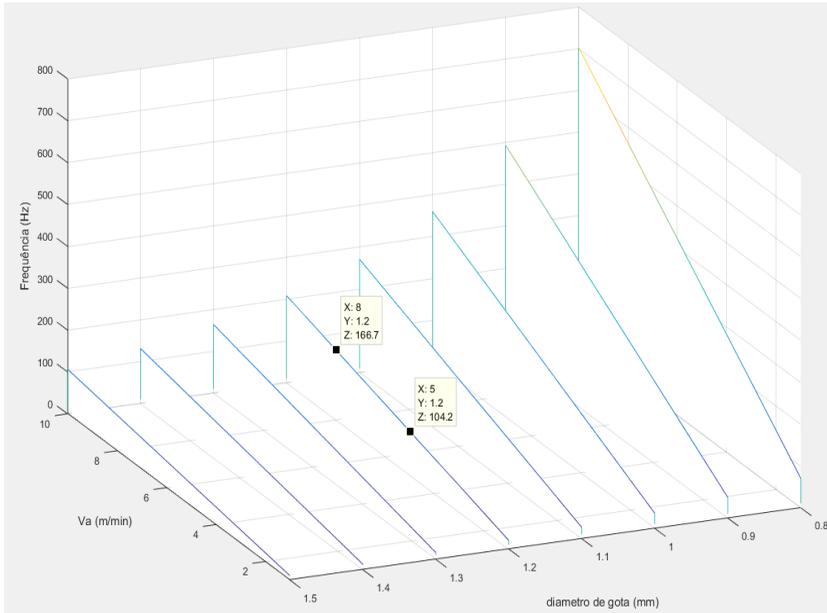


Figura 2.10 - Representação gráfica da frequência de transferência por velocidade de arame e diâmetro de gota.

O escopo deste trabalho compreende aplicações utilizando os modos de transferência por curto-circuito e goticular projetada. Dessa forma, estes são detalhados nos tópicos seguintes.

2.2.1 Transferência Goticular Projetada - Spray

A transferência goticular projetada, ou popularmente chamada de spray, é caracterizada pelo destacamento de pequenas gotas, da ordem do diâmetro do eletrodo [13], sequencialmente e em alta frequência. A Figura 2.11 mostra os oscilogramas de tensão e corrente, juntamente com imagens desse tipo de transferência.

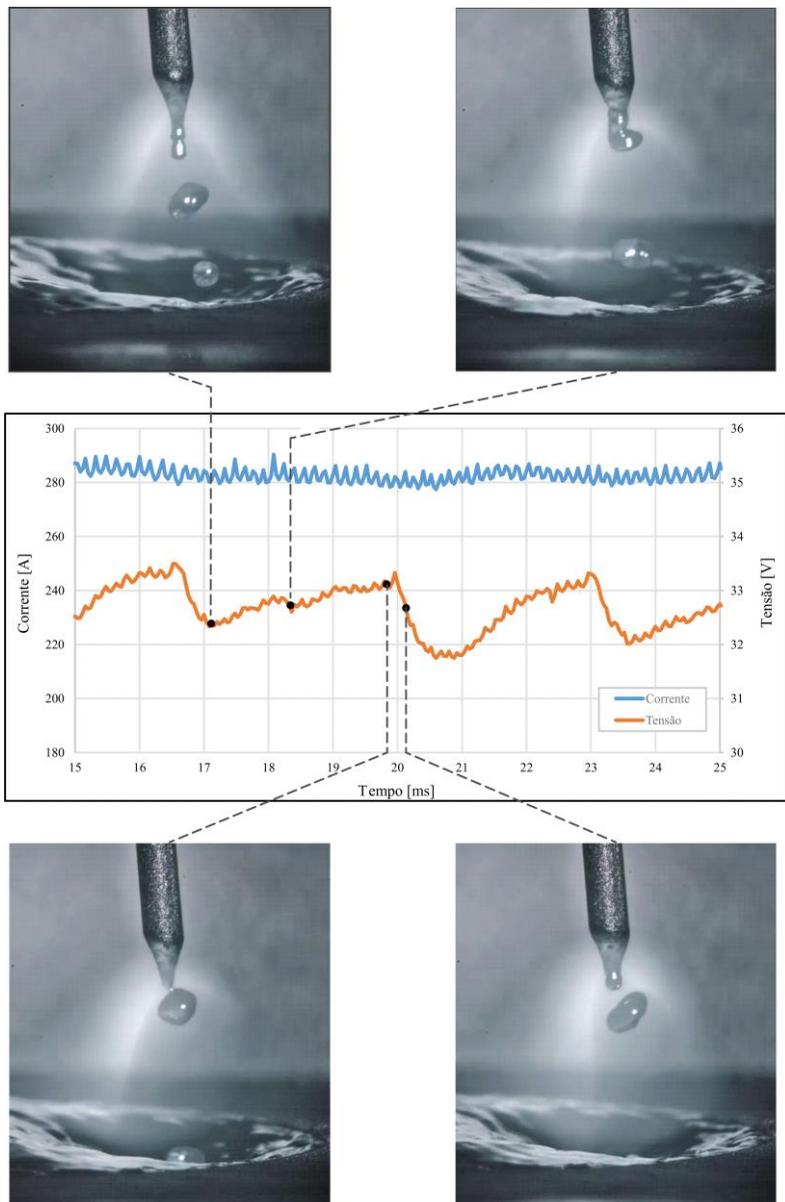


Figura 2.11 - Oscilogramas de tensão e corrente típicos para a transferência goticular projetada. Arame de aço carbono ER70S-6, processo em modo tensão constante, ajustada em 32,6 V e velocidade de arame a 9 m/min.

Uma condição indispensável para que este modo de transferência possa ocorrer é que a corrente de soldagem ultrapasse um valor crítico, denominado de corrente de transição. A corrente de transição depende, principalmente, do material e diâmetro do eletrodo, do seu comprimento energizado e do tipo de gás de proteção [3].

Quando se trabalha acima da corrente de transição, as gotas, submetidas a altas forças eletromagnéticas, passam a ser arrastadas compulsoriamente da ponta do eletrodo e projetadas com alta velocidade em direção à poça de fusão. Por não ocorrer um contato entre os eletrodos, a transferência é estável e livre de salpicos, resultando em um bom acabamento superficial do cordão de solda [14]. A trajetória de voo da gota coincide com o eixo do eletrodo, qualquer que seja a inclinação do eletrodo. Dessa maneira, a transferência goticular poderia ser empregada em qualquer posição. Entretanto, por demandar altas correntes, a alta energia imposta cria uma extensa poça de fusão, o que dificulta a soldagem fora da posição plana horizontal e de chapas finas.

2.2.2 Transferência por Curto-Circuito – MIG/MAG

O processo de soldagem MIG/MAG por curto-circuito utiliza a forma mais simples de equipamento. Neste caso, a fonte de soldagem é do tipo tensão constante e, conseqüentemente, a corrente que circula no processo é uma variável dependente, fundamentalmente, da velocidade de alimentação de arame e das propriedades físicas e químicas do mesmo. Dessa forma, os parâmetros configurados pelo usuário se limitam à tensão da fonte, velocidade de arame e vazão de gás [15].

Na configuração convencional do processo MIG/MAG com curto-circuito, o mecanismo de transferência de material do arame para a peça pode ser dividido em cinco etapas, conforme ilustrado na Figura 2.12.

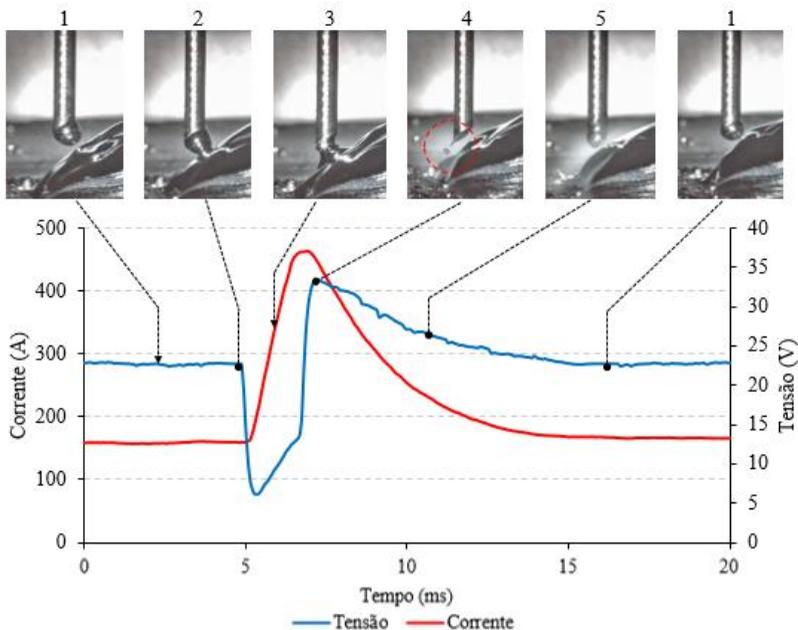


Figura 2.12 – Oscilogramas de tensão e corrente típicos para a transferência por curto-circuito [16].

O ponto inicial do período de transferência no modo por curto-circuito é caracterizado pela manutenção da tensão de referência ajustada pelo operador na fonte de soldagem. Esta tensão é responsável pela circulação de corrente e a preservação do arco aberto. Neste momento há o crescimento da gota de metal fundido na extremidade do arame, enquanto o mesmo avança em direção à peça.

O ponto indicado em 2 marca o início do curto-circuito. Neste momento, parte da gota é transferida à poça por tensão superficial. O contato da gota metálica com a poça de fusão faz com que o valor da corrente se eleve, em uma tentativa da fonte restabelecer o valor de tensão de referência.

Na etapa seguinte, de número 3, tem-se o processo de constricção da parte restante da gota que forma a ponte entre o eletrodo e a peça. Uma das principais forças que atuam nesse momento é a eletromagnética (efeito *pinch*), sendo sua intensidade tanto maior quanto maior o valor da corrente e menor a espessura da ponte.

Na quarta etapa, há o rompimento da ponte metálica e o reestabelecimento do arco em altos níveis de corrente. Esse fato gera um

efeito explosivo causando respingos, conforme destacado no detalhe da Figura 2.12.

Na quinta fase o valor da corrente cai a fim de conduzir a tensão ao valor de referência (valor de tensão ajustado para soldagem), a uma taxa de decrescimento determinada através da indutância da fonte de soldagem. Ao final da quinta fase tem-se início um novo ciclo do processo.

2.2.3 Controle dos Modos de Transferência

A Figura 2.13 mostra, para o arame de aço carbono de 1,2 mm de diâmetro e proteção gasosa de Ar+5%CO₂, o intervalo a partir do qual a transferência se dá pelo modo goticular projetado. A faixa de corrente mais baixa produz transferência de metal globular, irregular e comumente indesejada.

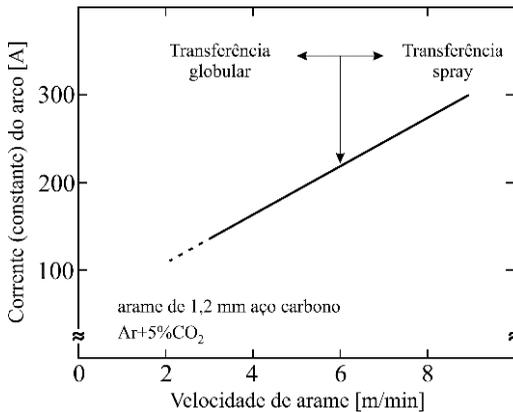


Figura 2.13 - Taxa de fusão para dada corrente DC para o arame de aço carbono de 1,2 mm de diâmetro e proteção gasosa de Ar+5%CO₂.

Adaptado de [13].

Visando modificar a transferência metálica em baixas faixas de alimentação e contornar a problemática relacionada com a transferência globular emprega-se a corrente pulsada. Esta técnica permite que qualquer corrente média, que normalmente produziria uma transferência globular, ou curto-circuito, seja modulada, de forma controlada, para gerar uma forma de onda de corrente que intercala entre níveis alto e baixo, conforme a Figura 2.14.

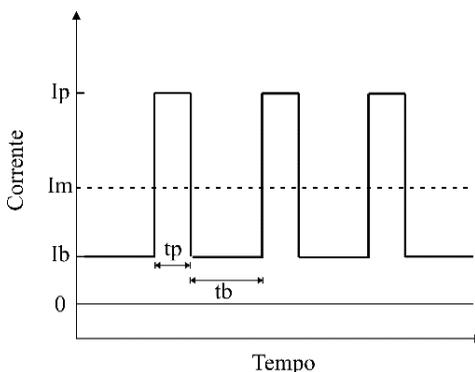


Figura 2.14 - Forma de onda quadrada para corrente pulsada.
Adaptado de [13].

O nível alto de corrente corresponde à corrente de pulso (I_p), o nível baixo, à corrente de base (I_b). A média da corrente (I_m) funciona como referência para o ajuste dos parâmetros. A principal função da corrente de base é manter o arco aberto, enquanto a corrente de pulso é ajustada para exceder o valor de transição e, assim, transferir uma pequena gota da ponta do arame. A forma de onda de pulso, portanto, produz uma série de pequenas gotas, em transferência tipo spray a uma corrente média que normalmente produziria transferência na faixa da globular ou do curto-circuito [13].

Já para o caso da transferência por curto-circuito, pode-se admitir que os desenvolvimentos nos processos buscam usufruir das vantagens desse tipo de transferência, tais como menor aporte térmico e menor nível de tensões residuais, possibilidade para realizar solda fora de posição, melhor direcionamento do arco e metal depositado. Complementarmente, buscou-se a eliminação ou redução de alguns inconvenientes do mesmo, como o excesso de respingos, geração de fumos e irregularidade na transferência metálica [17]. O maior limitante do modo convencional da soldagem MIG/MAG é o fato de não poder atuar diretamente na corrente de soldagem, que é a variável de maior influência no resultado da solda. Assim, ao longo dos anos foi possível desenvolver métodos que visam um melhor controle dessa variável na etapa de curto-circuito, principalmente, dando origem a processos classificados como curto circuito controlado. Três características são procuradas por esse controle, manter estabilidade térmica (transferência na mesma frequência e mesma energia elétrica), manipular a energia para a mesma taxa de deposição e

evitar respingos, resultados que felizmente se alcança com a mesma abordagem [3].

O princípio de funcionamento, como o próprio nome sugere, baseia-se na regulagem da corrente e seu controle em tempo real. Assim, as fontes convencionais que eram comandadas por tensão foram substituídas por fontes com controle de corrente. Para se obter tal controle, as diferentes técnicas deste processo fazem uso de alguma estratégia de monitoração e realimentação, de forma que a fonte possa responder à condição instantânea de operação de acordo com o que foi previamente programado.

Existem diferentes variações entre os fabricantes com relação à forma de onda fornecida pela fonte de corrente, dentre as quais pode-se citar o STT (*Surface Tension Transfer*) da empresa Lincoln Electric, WiseRoot da empresa Kemppi, RMD (*Regulated Metal Deposition*) da empresa Miller, coldArc da empresa EWM, o CCC da empresa IMC Soldagem, entre outros. Na Figura 2.15 é exemplificada a forma de onda do STT acompanhada das imagens da transferência metálica nos instantes indicados pelas letras de A até E.

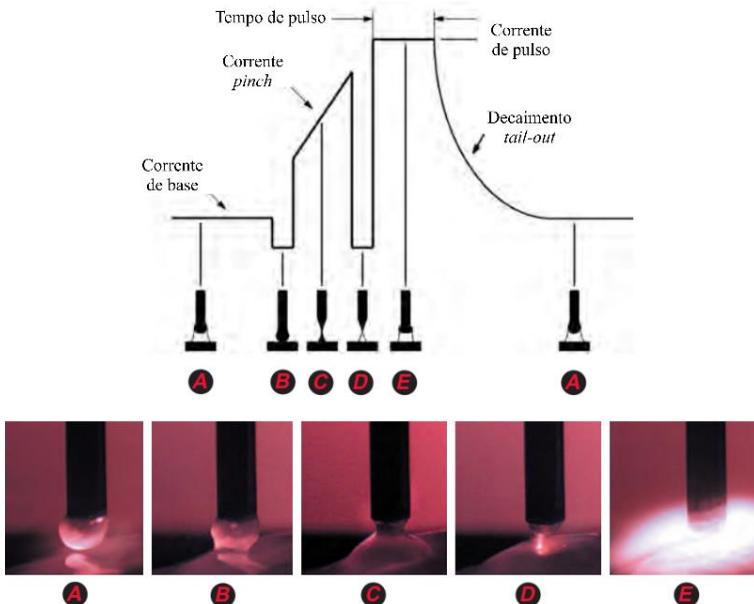


Figura 2.15 - Forma de onda do processo STT da empresa Lincoln Electric. Adaptado de [18].

Segundo o fabricante [18], a constrição da ponte metálica, iniciada ao fim da etapa B da Figura 2.15, é monitorada por meio de sinais elétricos e, na iminência de sua ruptura, a corrente é significativamente reduzida para que haja a reabertura do arco de forma suave e sem a produção de respingos (etapas D e E da figura). Dessa forma, atuando somente na corrente do processo a transferência pode ser controlada.

O próximo passo para a continuidade dos avanços tecnológicos no ramo foi dado no sentido de controlar ainda mais a transferência metálica, atuando em outras variáveis do processo. Após o sucesso no controle da corrente e das etapas envolvidas nas variadas versões dos processos de soldagem, objetivou-se o controle mais sofisticado da alimentação de arame e surgiram no mercado vertentes com a adição desse tipo de controle.

O processo conhecido como CMT trouxe uma grande inovação à soldagem ao introduzir o controle direto do movimento do arame. Esse controle adiciona o movimento de recuo de arame no momento da detecção do curto-circuito, auxiliando no destacamento da gota (Figura 2.16). Posicionado na tocha existe um motor de alta resposta dinâmica que permite o trabalho com frequências de inversão de movimento de até 70 Hz [19] (primeiras versões do equipamento). Esse movimento do arame, juntamente com o controle de corrente proporcionou ao CMT uma transferência metálica muito suave, com praticamente nenhum respingo e pouca geração de fumos [20].

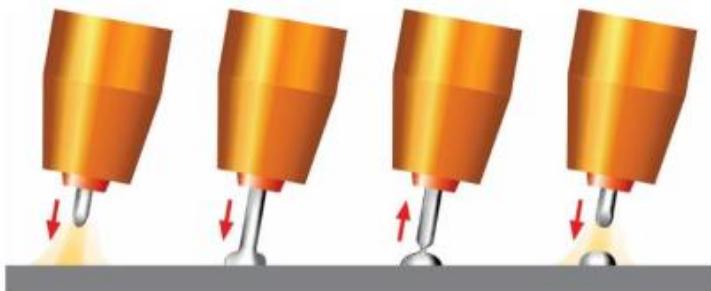


Figura 2.16- Movimento de avanço e recuo de arame para o CMT [1].

A dificuldade associada a essa movimentação, aqui chamada de alimentação dinâmica (AD) de arame, é, principalmente, o fato de ser necessária a utilização de frequências de inversão de movimento compatíveis com uma transferência por curto-circuito, uma vez que os

valores de frequência são dependentes, principalmente, da velocidade de arame desejada (Equação 2.3).

Atualmente, outros fabricantes já comercializam equipamentos que fazem uso da alimentação dinâmica. Dentre eles pode-se citar, além do CMT da empresa Fronius, o *Active Wire Process* (AWP) da empresa Panasonic [21], O *microMIG* da empresa SKS, o *synchro-feed* da empresa OTC Daihen [22] e o *Motion Control Weld* da empresa Cloos [23]. Os aspectos construtivos desse tipo de equipamento são tratados no capítulo seguinte.

3 ALIMENTAÇÃO DINÂMICA: EQUIPAMENTOS, VERSÕES E DEFINIÇÕES DO MIG/MAG AD

Dentre os equipamentos presentes no mercado atualmente, citados no capítulo anterior, o equipamento da Fronius é o de maior notoriedade. Este apresenta um maior número de versões, é objeto de estudos e publicações, foi, por um longo período, o único equipamento com alimentação dinâmica no mercado. Em suma, é encontrado um volume de informações maior sobre o mesmo e, por esses motivos, o CMT é abordado com maior ênfase neste trabalho.

3.1 EQUIPAMENTOS

A incorporação do controle eletromecânico em equipamentos de soldagem trouxe a necessidade da adaptação dos subsistemas existentes nestes equipamentos e a criação de dispositivos intermediários de forma a comportar a nova dinâmica do arame. Como destaque pode-se elencar: tocha, *buffer* e a própria fonte de soldagem.

Conforme esquematizado na Figura 3.1, a fonte de soldagem, por ser a peça central do sistema, deve ter capacidade de processamento e comunicação com os elementos considerados periféricos, tais como *buffer*, cabeçote alimentador de arame e a tocha de soldagem. De forma geral, qualquer fonte moderna equipada com controle microprocessado (digital), que realiza a leitura de variáveis do arco e capaz de trabalhar em controle de corrente estaria apta para suportar um processo de alimentação dinâmica. As únicas ressalvas serão ligadas a disponibilidade de portas de entrada/saída no microcontrolador e, principalmente, velocidade de amostragem e resposta do sistema de controle central.

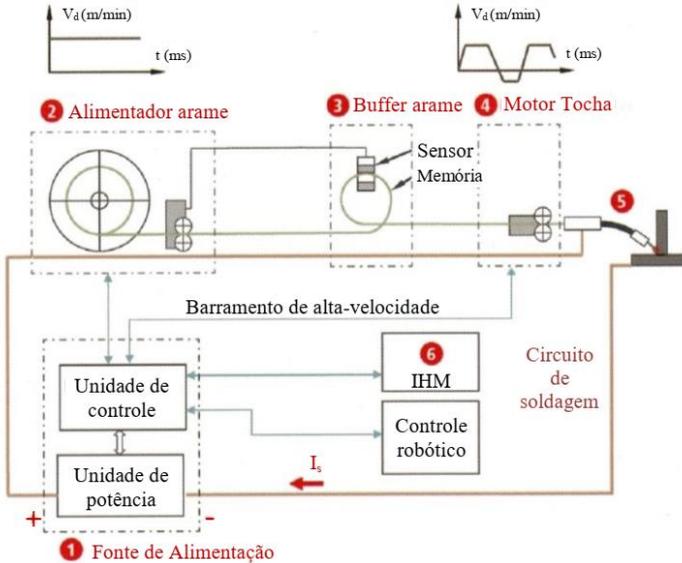


Figura 3.1 – Esquema do equipamento CMT. Adaptado de [24].

Na Figura 3.2 é possível visualizar a configuração básica dos componentes do CMT para a realização de um procedimento de soldagem. Com relação aos subsistemas periféricos mais importantes e diferenciados para a alimentação dinâmica, é realizada uma análise mais detalhada nos tópicos seguintes.



Figura 3.2 - Disposição de componentes básicos do sistema CMT. 1) Fonte de alimentação; 2) Cabeçote alimentador de arame 3) *Buffer* de arame; 4) Tocha de soldagem. [1]

3.1.1 Tocha

A grande modificação em termos de aparato em sistemas de soldagem AD se faz presente nas tochas de soldagem. Para que haja movimentação efetiva de arame na região do arco, foi necessário integrar um servomotor no corpo da tocha de soldagem. Quase todos os fabricantes citados no capítulo 1 fazem uso desse tipo de acionamento em suas respectivas tochas [19] [21] [25] [26]. A única exceção é o sistema da SKS que utiliza um motor *brushless* DC [27]. As tochas dos fabricantes Cloos, OTC Daihen e SKS podem ser visualizadas Figura 3.3.



Figura 3.3 - Tochas equipadas com acionamentos voltadas à alimentação dinâmica. 1) Cloos MoTion Control Weld; 2) OTC Daihen Synchro feed [28]; 3) SKS microMIG [27].

Para o processo MIG/MAG tipo AD, a atuação no retorno do arame está diretamente ligada às condições de transferência metálica. As versões que utilizam este fundamento operam na faixa onde a transferência acontece por curto-circuito e, por esse motivo, o sistema de movimentação deve ter a dinâmica necessária para suprir as faixas de frequência dessa natureza de transferência [1]. Na Figura 2.10, pode-se observar a ampla faixa de frequência de acordo com as condições de velocidade de arame e diâmetro de gota a se trabalhar. Entretanto, se observa que a frequência de transferência pode ultrapassar a faixa de 100 Hz sem muita dificuldade a depender das condições exigidas. Esta

circunstância se torna um forte obstáculo em se tratando de um sistema mecânico, a exemplo do servomotor e o sistema de transmissão de movimento integrado na tocha.

Apesar dessa problemática, o fabricante Fronius aprimorou ao longo dos últimos anos a tocha do sistema CMT. Os primeiros modelos de tocha lançados pela empresa trabalhavam em uma frequência de inversão de até 70 Hz [19], as versões atuais, em contrapartida, passaram a executar procedimentos em frequências de inversão de até 130 Hz [24]. Uma imagem do último modelo da tocha CMT é apresentada na Figura 3.4.



Figura 3.4 – Fronius *Robacta Drive* – Tocha CMT [29].

3.1.2 *Buffer*

Em termos gerais, o sistema de alimentação de arame em equipamentos que fazem uso da alimentação dinâmica é composto por dois acionamentos: um principal e outro auxiliar. O acionamento dito principal, localizado na tocha ou em suas proximidades, é responsável por inserir as altas dinâmicas que compõem o movimento. Já o auxiliar, situado no cabeçote de arame, é responsável por extrair o arame do rolo de armazenagem, dentro do próprio cabeçote, e fornecê-lo ao motor

principal, eliminando grande parte da carga de tração. Dessa forma, se torna necessário que haja algum tipo de sincronia entre esses acionamentos para que a alimentação de arame se dê de forma controlada e o procedimento em curso não seja interrompido por excesso ou falta de arame.

As soluções desenvolvidas por alguns fabricantes convergem para um dispositivo intermediário chamado de *buffer*, pulmão ou desacoplador. O diagrama da Figura 3.5 ilustra o funcionamento de um processo que utiliza o *buffer* como solução para a sincronia de diferentes sistemas de movimentação de arame. Esta solução é dotada de um mecanismo para medição de deslocamento de arame que fornece ao microcontrolador central a informação de excesso ou falta de arame na porção intermediária do cabeamento entre a fonte de soldagem e tocha. A partir desta informação, o controlador da fonte de soldagem envia o sinal de controle necessário para o motor secundário a fim de realizar a correção e atingir o equilíbrio na velocidade de arame, isto é, a velocidade de alimentação de arame (V_{IN}) igual à velocidade de consumo do mesmo (V_{OUT}).

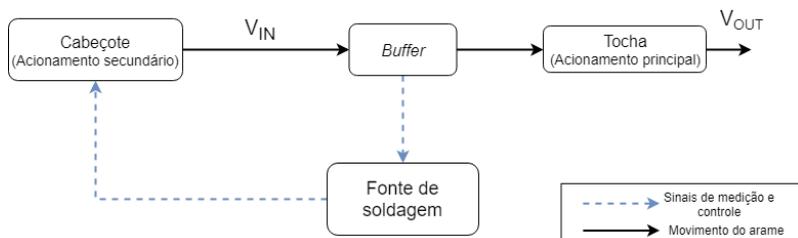


Figura 3.5 – Diagrama esquemático do sistema de alimentação de arame.

Dentre os equipamentos comerciais pode-se destacar as soluções desenvolvidas pelos fabricantes Fronius e OTC Daihen para seus respectivos sistemas de soldagem AD. Na Figura 3.6 é mostrado o *buffer* da Fronius. A alavanca presente no mesmo é responsável por transmitir o movimento do conduíte de arame em deslocamento angular de forma que a informação possa ser lida pelo sistema. Em uma situação momentânea em que o consumo de arame é maior que seu fornecimento, por exemplo, a alavanca tende a se posicionar na extremidade inferior, conforme a foto mostrada em A na Figura 3.6. De forma análoga, quando o fornecimento de arame é maior que seu consumo há o acúmulo de arame no *buffer*, o

que faz a alavanca se deslocar para a posição superior, situação mostrada na foto B da Figura 3.6.

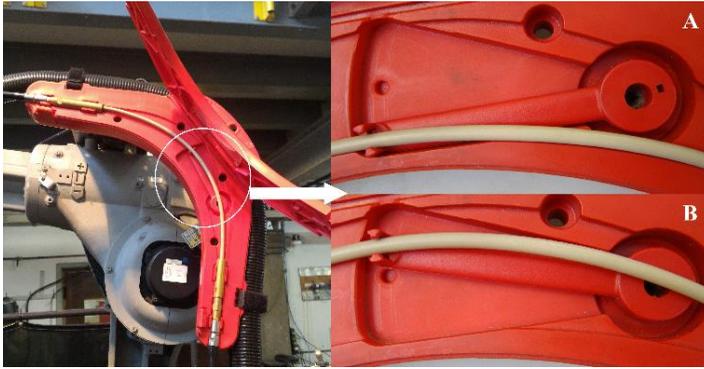


Figura 3.6 - *Buffer* presente no equipamento da empresa Fronius.

O *buffer* da empresa OTC Dahein é mostrado na Figura 3.7. Segundo informações do fabricante [25], o formato em “S” permite a expansão da quantidade de arame dentro do dispositivo sem que haja resistência mecânica e sem a geração de fricção na mangueira de soldagem. Ainda segundo o fabricante, existe um *encoder* no equipamento que realiza medições da posição do arame e realimenta a informação ao motor secundário do sistema para o controle da quantidade de arame.



Figura 3.7 - *Buffer* presente no equipamento da empresa OTC Dahein [30].

O principal elemento do *buffer* é o mecanismo capaz de transformar o movimento do arame dentro do mesmo em uma informação útil ao controlador da fonte. O desenvolvimento de uma solução semelhante ao equipamento da empresa OTC Dahein, utilizando um *encoder* óptico, foi descartada pelos altos custos financeiro e computacional envolvidos. A infraestrutura do LABSOLDA conta com o sistema de soldagem da empresa Fronius e já foram conduzidos estudos relativos ao mesmo [3, 4]. Assim, a solução desenvolvida ao longo deste trabalho foi feita de forma semelhante àquela proposta por esse equipamento.

3.2 VERSÕES

O alto nível de controlabilidade atingido pelo equipamento da Fronius possibilitou a criação de várias versões correlatas ao CMT. Cada uma das versões desenvolvidas é brevemente descrita nos tópicos seguintes.

3.2.1 CMT

A primeira versão do processo MIG/MAG com alimentação dinâmica lançada pela Fronius foi o CMT. Esta versão é definida pelo uso de uma única polaridade, eletrodo positivo, e pela transferência, majoritariamente, por curto-circuito.

O funcionamento do CMT pode ser compreendido com o auxílio dos oscilogramas idealizados e imagens associadas aos instantes indicados da Figura 3.8.

O ponto de início é marcado pelo frame (1), correspondente ao instante que ocorre a abertura do arco. Apesar de o arame continuar sendo puxado, esse também é o momento que o motor da tocha começa a desacelerar visando a inversão do movimento. O instante registrado pelo frame (2) indica o ponto onde a velocidade de arame na tocha passa por zero (aramé parado). Após a abertura do arco, a fonte impõe um pulso de corrente. O objetivo é promover a fusão do arame e formação da gota metálica durante um tempo de pulso pré-configurado. Com o arame em movimento de avanço e a gota formada, a corrente de arco é então reduzida no instante (3) até que ocorra o contato do arame com a poça (5), ou seja, o curto-circuito. Reduzir a corrente antes do curto contribui para a redução do nível de respingos provocados pela ação de forças eletromagnéticas repulsivas atuantes na gota. Pode-se citar ainda que há

contribuição para a redução dos fumos provocados pela vaporização metálica.

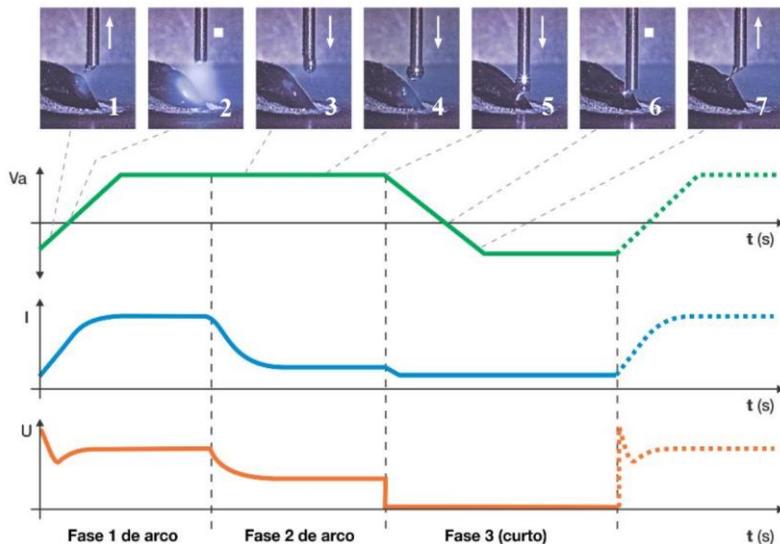


Figura 3.8 - Oscilogramas idealizados exemplificando o funcionamento do processo CMT [1].

O contato do arame com a peça é detectado pela queda no valor de tensão para níveis próximos a 0 V. Esse momento marca o início da desaceleração do arame para que ocorra a inversão no movimento. O frame (6) registra o ponto onde a velocidade de arame passa novamente por zero e inicia de fato o movimento de recuo. No momento da detecção do curto, a corrente é novamente reduzida. A transferência metálica acontece, fundamentalmente, pela ação da força de tensão superficial e pelo movimento de recuo do arame. A redução da corrente no curto-circuito contribui também para a redução de fumos e respingos. Nos momentos próximos a abertura do arco, a ponte metálica se torna bastante delgada. Uma alta densidade de corrente nessas condições pode provocar a vaporização metálica, com tendência de fumos e micro explosões formadoras de respingos no instante do rompimento. A iminência da ruptura da ponte metálica é apresentada no frame (7), onde posteriormente se tem reabertura do arco e início de um novo ciclo [1].

3.2.2 CMT *Pulse* (CMT+P)

O CMT *Pulse* surgiu da combinação direta entre o processo CMT e o processo MIG/MAG pulsado, trazendo vantagens de ambos. Versões que utilizam corrente pulsada apresentam vantagens tais como a estabilidade e controlabilidade da transferência metálica e da poça de fusão, além de menor tendência de falta de fusão e porosidades [31]. Apesar dessas características, a corrente pulsada promove uma alta potência para a quantidade de arame que está sendo depositada. Este fato é evidenciado no trabalho de Pickin et al. [32] no qual os autores comparam os processos CMT e Pulsado em um revestimento multipasses utilizando ligas de alumínio. Na Figura 3.9 tem-se um gráfico comparativo entre os processos, relacionando a taxa de deposição de material em função da potência instantânea do arco. Nota-se que, para uma dada taxa de deposição, o modo pulsado fornece maior potência que o processo CMT.

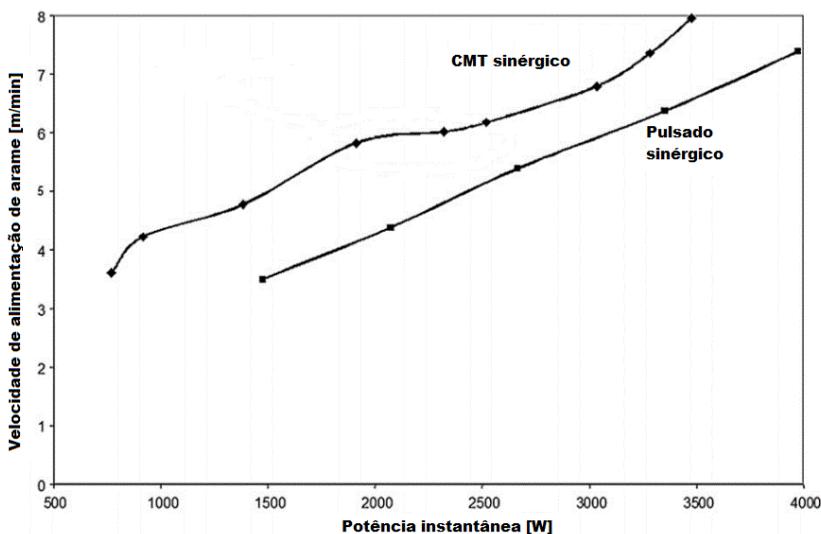


Figura 3.9- Comparativo entre taxas de deposição para o programa sinérgico CMT e soldagem pulsada utilizando arame Al 4043.

Adaptado de [32].

O acréscimo de pulsos intercalados com curtos-circuitos flexibiliza a regulação do procedimento com a possibilidade de adoção de diferentes níveis de aporte térmico, sem comprometer a estabilidade

do arco e mantendo-se ausente de respingos. Dessa forma, a faixa de potência que o processo atua aumenta significativamente. De acordo com o fabricante, este processo atinge qualquer valor na faixa de energia entre CMT e arco pulsado [33]. O gráfico da Figura 3.10 ilustra a faixa de potência em que se encontram os processos em questão para a linha sinérgica do arame ER4043 de 1,2 mm de diâmetro.

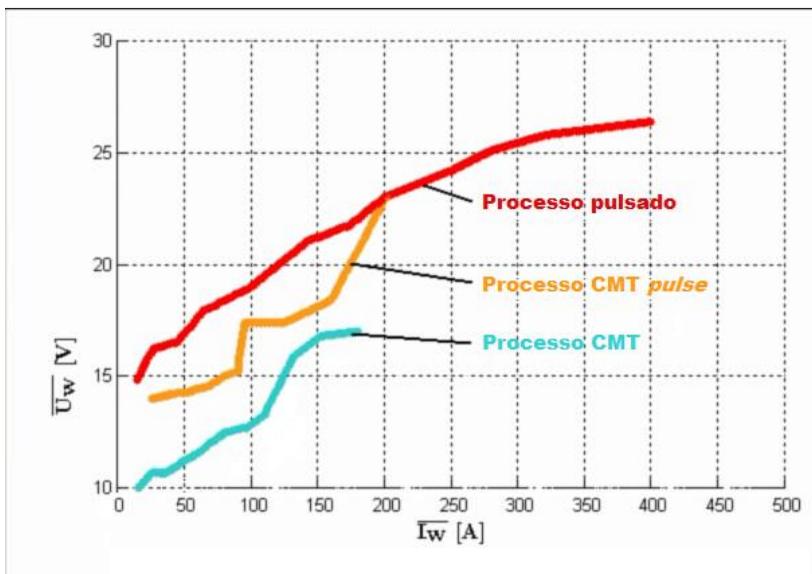


Figura 3.10 - Relação entre tensão média e corrente média para os processos pulsado, CMT e CMT+P. Linha sinérgica do arame 4043 1,2 mm de diâmetro. Adaptado de [10].

O trabalho de Pang et al. [34] defende que o aporte térmico pode ser melhor ajustado e controlado no processo CMT+P quando comparado ao processo CMT tradicional. Como resultado, o perfil de penetração e as dimensões do cordão de solda também podem ser controlados, variando-se o número de curtos-circuitos CMT e pulsos de corrente. A Figura 3.11 mostra o esquemático para o formato da onda do CMT+P para um macroperíodo composto por 2 ciclos do processo pulsado e 1 ciclo do processo CMT. Na transferência pulsada, a altura do arco é regulada através de uma velocidade de arame constante. A quantidade de períodos dentro do ciclo CMT, assim como a quantidade de períodos de pulsação, é configurável pelo usuário.

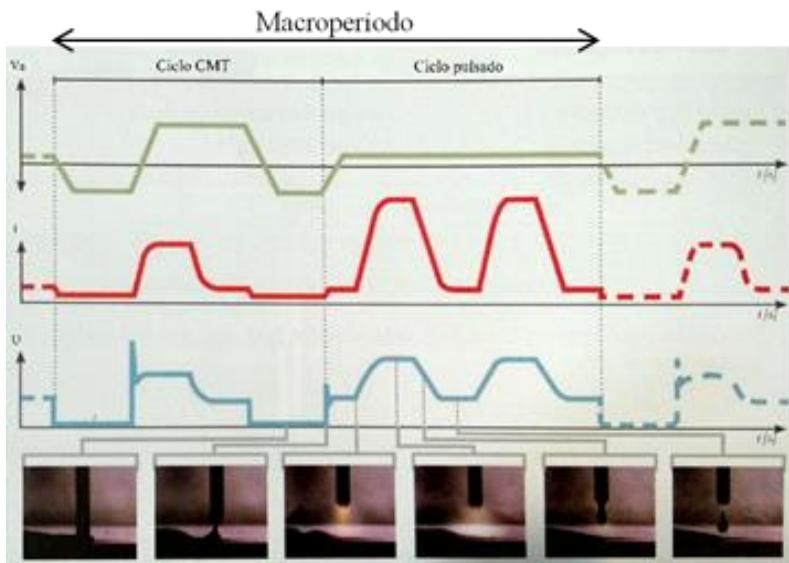


Figura 3.11 - Oscilogramas exemplificando o funcionamento do processo CMT+P. Adaptado de [24].

3.2.3 CMT *Advanced* (CMT *adv*)

O CMT *Advanced* é a variante que incorpora a alternância de polaridade ao processo CMT. A dinâmica de transferência metálica se dá de forma análoga ao processo CMT tradicional, majoritariamente por curto-circuito. Os oscilogramas da Figura 3.12, juntamente com as imagens associadas aos instantes indicados exemplificam o funcionamento da variante em uma situação de apenas um ciclo na fase positiva e um ciclo na fase negativa. De forma semelhante ao CMT+P, a quantidade de ciclos nas fases positiva e negativa é regulável pelo usuário.

Destaca-se que, no processo CMT *Advanced*, a mudança de polaridade ocorre na etapa de curto-circuito. Após a troca de polaridade, o arame é recuado e o arco é reestabelecido na polaridade especificada para aquele ciclo [24]. Dessa forma o processo não se sujeita a instabilidades geradas por alternância de polaridade enquanto o arco permanece aberto.

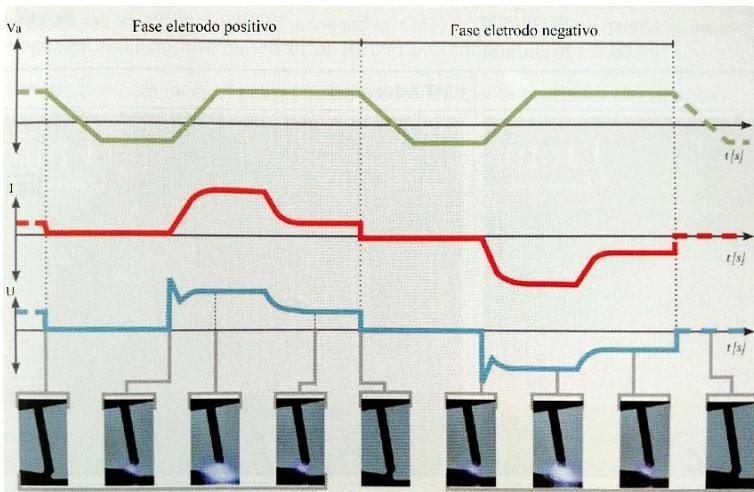


Figura 3.12 - Oscilogramas exemplificando o funcionamento do processo CMT *Advanced*. Adaptado de [24].

A alternância entre polaridades permite alcançar menores níveis de aporte térmico quando comparado ao CMT tradicional [24] [35]. O operador pode selecionar o número de eventos consecutivos das polaridades positiva e negativa. O período positivo é determinante na penetração do cordão e no efeito de limpeza catódica. O período negativo aumenta consideravelmente a taxa de fusão, o que significa que, para os mesmos níveis de energia, o uso de polaridade negativa implica em maior fusão do arame [24] [20].

As características do CMT *Advanced* o tornam bastante atrativo para aplicações de manufatura aditiva por soldagem a arco, ou WAAM (*Wire Arc Additive Manufacturing*) como vem sendo denominada esta técnica, sendo considerada por alguns autores [36] [37] a melhor opção quando se trata de WAAM, pois, segundo os mesmos, além do baixo aporte térmico esta versão oferece um maior controle sobre a poça de fusão.

3.2.4 CMT *Pulse Advanced* (CMT+P *adv*)

A variante CMT *Pulse Advanced* consiste na alternância entre modos de transferência (curto-circuito e goticular projetada) e alternância de polaridade. Como o próprio nome sugere, é a combinação entre as variantes CMT *Pulse* e CMT *Advanced*.

A Figura 3.13 mostra um exemplo de forma de onda possível com a variante *CMT Pulse Advanced*. Na imagem, tem-se a alternância entre um ciclo negativo de transferência do tipo CMT e um ciclo positivo de dois períodos de pulsação de corrente. Do mesmo modo que no *CMT Pulse*, é possível distinguir a fase de pulsação de corrente, com uma velocidade de arame constante, dos ciclos de CMT, com o movimento de avanço e recuo. O sistema permite que o operador regule tanto o número de eventos consecutivos de CMT na polaridade negativa como também a quantidade de pulsos de corrente na polaridade positiva [20].

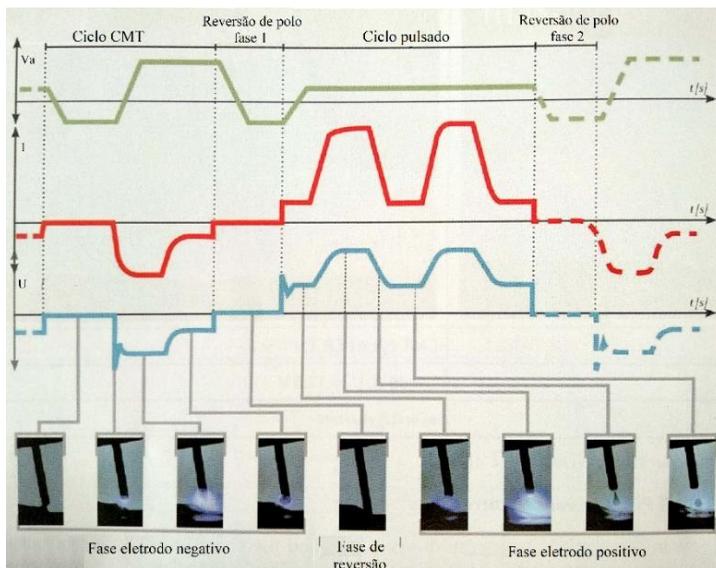


Figura 3.13 - Oscilogramas exemplificando o funcionamento do processo *CMT Pulse Advanced*. Adaptado de [24].

3.2.5 CMT *Pin* e CMT *Print*

Os desenvolvimentos promovidos pela empresa Fronius a partir do *know-how* acumulado do processo CMT permitiu o surgimento de variantes que extrapolam a soldagem do ponto de vista clássico. Como exemplos podem-se citar o *CMT Pin* e o *CMT Print*, desenvolvidos em 2009 [8].

O *CMT Pin* consiste na deposição de pinos de arame sobre uma superfície metálica, conforme a Figura 3.14. É possível modificar a altura

e selecionar três diferentes formatos para a cabeça do pino: esférico, cilíndrico e pontiagudo. Como aplicações dessa variante, o fabricante [8] sugere a criação de espaçadores, pinos âncora, união de superfícies metálicas com plástico ou borracha e como auxílio em montagens de forma geral. O oscilograma esquemático do funcionamento desta variante é mostrado na Figura 3.15.

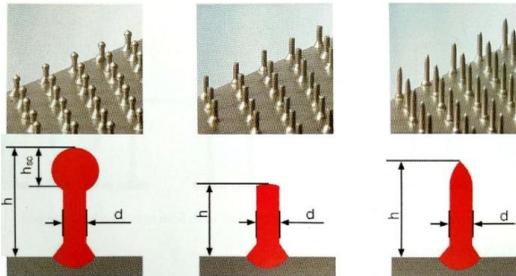


Figura 3.14 – Três formatos de cabeça de pino produzidos pela variante CMT *Pin* [24].

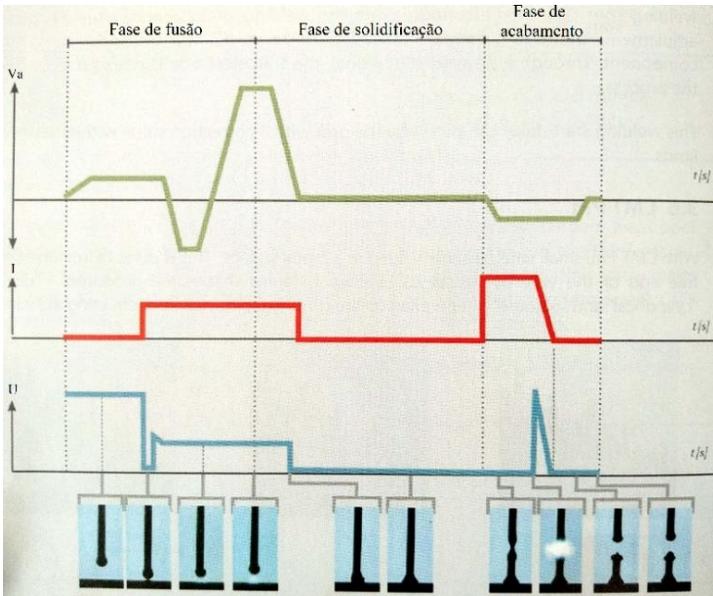


Figura 3.15- Oscilogramas exemplificando o funcionamento do processo CMT *Pin*. Adaptado de [24].

A duração da fase de solidificação é determinante para a altura final do pino e a fase de acabamento é responsável por moldar a extremidade do pino de acordo com o ajustado pelo usuário [24].

Já a variante denominada *CMT Print* consiste na deposição de uma pequena porção de arame fundido em uma superfície metálica visando a formação de pontos que, segundo o fabricante [24], têm sempre a mesma dimensão. Como aplicações dessa variante o fabricante [8] sugere escrita em braile, criação de superfícies antiderrapantes, maçanetas e demarcação de peças. Exemplos de aplicações dessa variante são mostrados na Figura 3.16 e o esquemático do funcionamento é exibido na Figura 3.17 na forma de oscilogramas.



Figura 3.16 – Peças com acabamento realizado pela variante *CMT Print* [8].

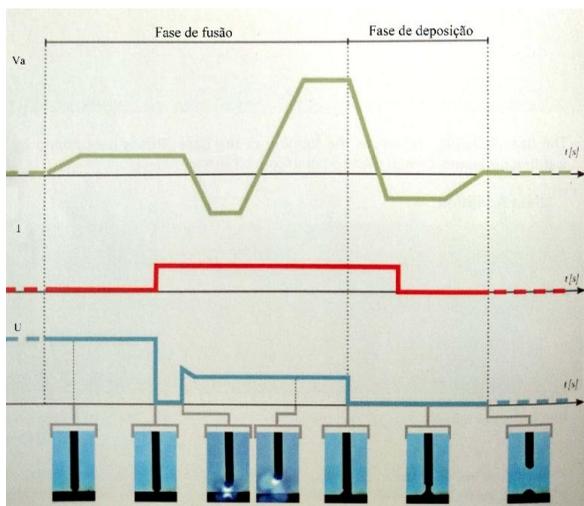


Figura 3.17- Oscilogramas exemplificando o funcionamento do processo *CMT Print*. Adaptado de [24].

3.3 DEFINIÇÃO DE REQUISITOS DO MIG/MAG AD

Após o conhecimento das diferentes variantes do CMT e suas tecnologias associadas, são reunidas informações que nortearam a concepção do protótipo nacional de alimentação dinâmica voltado à soldagem MIG/MAG.

Pode-se traçar um paralelo entre o trabalho aqui desenvolvido e o trabalho de Wu e Kovacevic [38], no qual estes desenvolveram um sistema oscilatório de arame controlado por PC. Os autores definiram o comportamento oscilatório do arame a partir de seis parâmetros:

- (1) A velocidade média de alimentação,
- (2) A frequência de oscilação,
- (3) A velocidade de avanço,
- (4) O deslocamento no avanço,
- (5) A velocidade de recuo e
- (6) O deslocamento no recuo.

Cada um desses parâmetros também se faz presente, de forma direta ou indireta, no sistema do MIG/MAG AD. Assim cada parâmetro enumerado é brevemente discutido nos parágrafos seguintes.

Considerando o trabalho aqui desenvolvido, a velocidade média de alimentação é fortemente dependente dos níveis de corrente utilizados e da frequência de transferência (Equação 2.3), sendo apenas uma consequência do conjunto de parâmetros ajustados em um determinado procedimento.

A velocidade de avanço e velocidade de recuo deverão ser ajustadas pelo usuário visando maior flexibilidade e oportunidade de pesquisa. O deslocamento no sentido de avanço não é ajustável. O arame avança até que haja o contato entre poça de fusão e eletrodo. Este momento é refletido na tensão do arco, que é constantemente monitorada pelo sistema central de controle da máquina de solda. Já o deslocamento no sentido de recuo é ajustável pelo usuário e é determinante para a máxima altura do arco.

A partir das ponderações expostas acima e da forma de onda da corrente, baseada no processo CMT, apresentada na Figura 3.18, definiu-se os parâmetros a compor o sistema flexível de alimentação dinâmica. A Tabela 3.1 reúne todos os parâmetros disponíveis para manipulação pelo usuário juntamente com um breve descritivo dos mesmos.

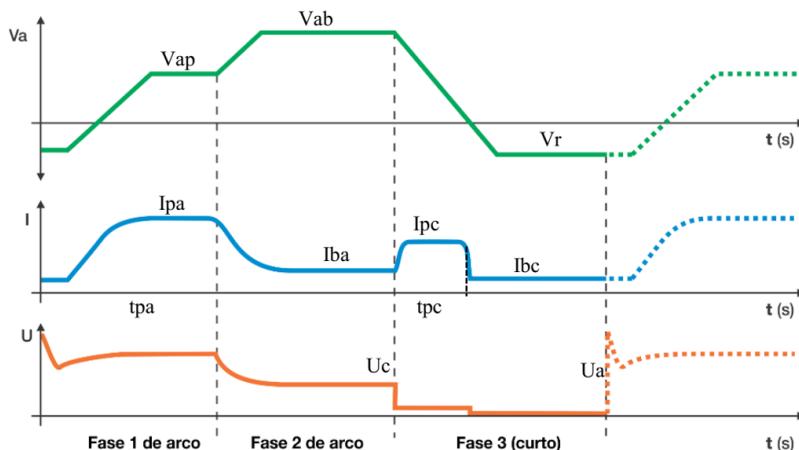


Figura 3.18 - Divisão do período de transferência e parâmetros principais.

Tabela 3.1 - Parâmetros disponíveis ao usuário para regulagem.

	Parâmetro	Unidade	Descrição
Básicos	Ipa	A	Corrente de pulso no arco
	Iba	A	Corrente de base
	Ipc	A	Corrente de pulso no curto
	Ic	A	Corrente de curto
	tpa	ms	Tempo de pulso no arco
	tpc	ms	Tempo de pulso no curto
	Vap	m/min	Velocidade de avanço de arame no pulso
	Vab	m/min	Velocidade de avanço de arame na base
	Vr	m/min	Velocidade de recuo de arame
	cArc	mm	Comprimento de arco
Especiais	Cauda	-	Habilitar cauda de decaimento entre Ipa e Iba
	Mergulho	ms	Tempo de avanço de arame após o curto-circuito
	Atraso	ms	Atraso no recuo do arame após o curto-circuito
	NPul	-	Número de períodos do processo pulsado
	nAD	-	Número de períodos do processo MIG/MAG-AD
	Correção	-	Correção de comprimento de arco

Os parâmetros classificados como especiais na tabela acima surgem como alternativa ao usuário para modificar a forma de onda definida na Figura 3.18. O parâmetro “cauda” habilita um decaimento exponencial da corrente de pulso para a corrente de base. O parâmetro “mergulho” faz com que a identificação do curto-circuito seja atrasada de forma que o arame continue sua movimentação para dentro da poça de

fusão, realizando um mergulho na mesma. O parâmetro “atraso” serve para manter o arame parado após a identificação do curto-circuito. É, portanto, um atraso referente ao movimento de retorno do arame. Os parâmetros “nPul” e “nAD” realizam a alternância entre o modo de transferência pulsada e por curto-circuito, de forma análoga ao processo CMT+P, com os parâmetros indicando o número de transferências em pulsação e número de transferências em curto-circuito, respectivamente. O parâmetro “correção” atua nas velocidades de avanço e recuo de arame de forma a modificar o comprimento do arco. Cada um desses parâmetros será melhor abordado em momento oportuno ao longo deste documento.

4 DESENVOLVIMENTO DO PROCESSO

Os estudos relacionados ao entendimento das versões do processo MIG/MAG com alimentação dinâmica do arame dentro da equipe do LABSOLDA foram iniciados em 2011 com o trabalho de mestrado de Marques [20]. Os conhecimentos adquiridos desde então formaram a base necessária para que em 2016 tivesse sido concluída a construção de um primeiro dispositivo próprio de alimentação dinâmica voltado à soldagem MIG/MAG [15]. Com relação aos aspectos construtivos, o sistema se encontra em seu terceiro protótipo. Ao longo do desenvolvimento [1] houve o progresso nos aspectos construtivos e foram abordadas diferentes técnicas do ponto de vista do controle do movimento do arame a fim de avaliar e obter um processo repetitivo, estável e robusto. Nesta seção descreve-se os avanços na construção do dispositivo de alimentação dinâmica integrado à tocha, a construção do sistema de medição presente no buffer e as estratégias de software desenvolvidas a fim de otimizar o funcionamento do protótipo.

4.1 DESENVOLVIMENTO DA TOCHA

4.1.1 Projeto e Construção do Protótipo

A tocha de soldagem de um sistema de alimentação dinâmica para o processo MIG/MAG deve ser capaz de promover o movimento de avanço e recuo em frequências elevadas, na ordem de até 100 Hz. Assim, se fez necessário um projeto considerando algum tipo de acionamento que atingisse essa faixa de frequência de inversão de movimento.

O primeiro passo para a construção do protótipo foi a definição de um sistema de acionamento que atendesse as demandas requeridas pelo processo. Foram avaliadas três diferentes tecnologias de acionamento como candidatas a compor o sistema de soldagem MIG/MAG AD: motor CC, motor de passo e o sistema, denominado comercialmente, de servomotor AC. Os ensaios conduzidos levaram à conclusão de que o sistema composto pelo servoacionamento é o mais indicado para o perfil de movimento requerido [39, 1].

O conjunto de servoacionamento usado nos experimentos iniciais (Panasonic) apresentou resultados promissores, porém o mesmo possuía características construtivas que poderiam dificultar a evolução pretendida para o processo MIG/MAG AD, tais como grandes dimensões e um momento de inércia do rotor relativamente alto.

Assim, buscou-se adquirir outro conjunto de servomotor e drive que apresentasse características construtivas que seriam mais favoráveis ao movimento de avanço e recuo do arame. Sobretudo, o principal aspecto considerado para a seleção de um novo equipamento foi a relação entre torque e momento de inércia do motor além de dimensões reduzidas. Com isso, o sistema adquirido para nova etapa de testes foi o conjunto da empresa Kollmorgen, ilustrado na Figura 4.1. As especificações dos servomotores trabalhados mais relevantes ao projeto estão apresentadas na Tabela 4.1 e uma análise comparativa das dimensões dos mesmos pode ser visualizada na Figura 4.2.

Tabela 4.1 - Valores nominais das especificações principais dos diferentes servomotores utilizados.

	Torque [N·m]	Velocidade [RPM]	Inércia [kg·cm ²]
Panasonic	0,32	3000	0,054
Kollmorgen	0,18	8000	0,017



Figura 4.1 - Conjunto servoacionamento Kollmorgen. Drive AKDP00306NBCC-0; Motor AKM11B-AKMNC-00.



Figura 4.2 – Comparativo das dimensões dos servomotores utilizados nos experimentos: Panasonic (acima) e Kollmorgen (abaixo).

O projeto da tocha foi realizado por meio de um software CAD (Solidworks), a partir do modelo 3D do servomotor disponibilizado pelo fabricante. Agregou-se ao modelo os elementos necessários a realização de um procedimento de soldagem sobre uma chapa base polimérica isolante. A Figura 4.3 exibe o projeto concebido e seus principais componentes são destacados.

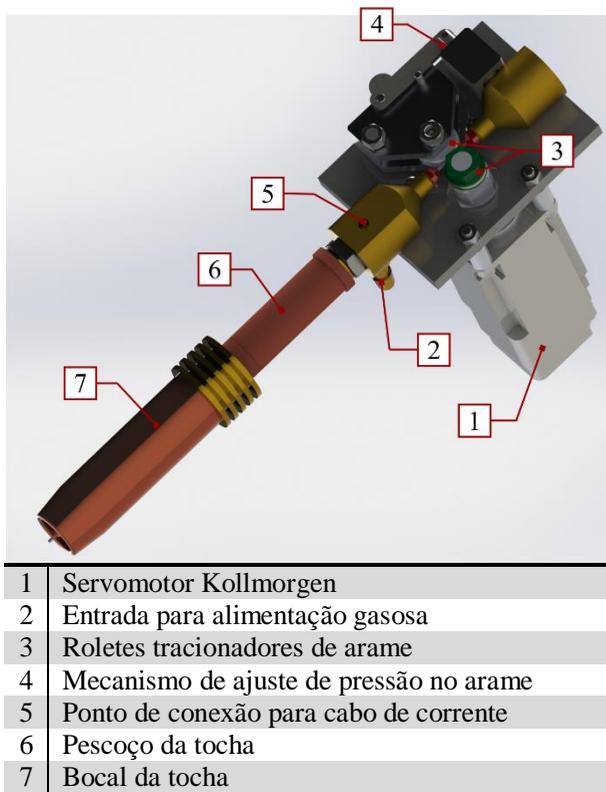


Figura 4.3 - Projeto mecânico do protótipo de tocha para o sistema MIG/MAG AD.

As peças projetadas foram fabricadas por processos de usinagem e, complementando com componentes de tochas comerciais de soldagem, o protótipo foi montado. A Figura 4.4 mostra o protótipo de tocha instalado em um manipulador cartesiano e destaca o mecanismo para tracionamento do arame.

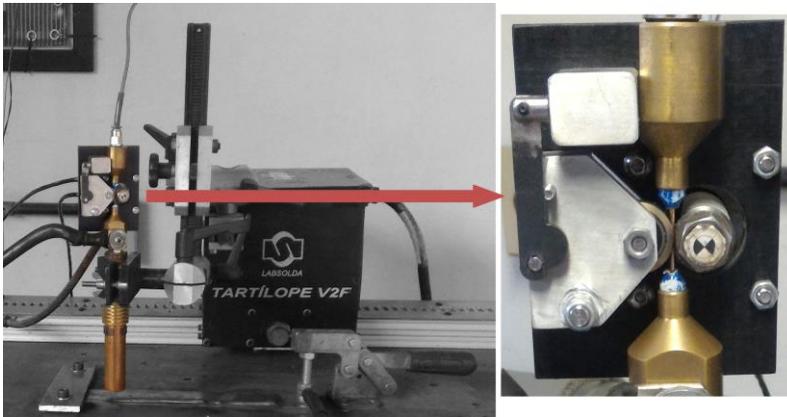


Figura 4.4 – Protótipo de tocha adaptada para o sistema MIG/MAG AD, destacando os roletes tracionadores.

4.1.2 Sintonia do Controle do Servomotor

A sintonia do controlador é o processo de ajuste dos coeficientes necessários para o servo *drive* otimizar o controle especificamente para a aplicação na qual o servomotor está inserido. Esse processo é realizado por meio do software WorkBench, disponibilizado pelo fabricante e responsável pela configuração do conjunto do servoacionamento. O WorkBench possibilita a utilização do servomotor em um chamado “modo de serviço”, no qual é possível comandar o movimento do motor via PC e fazer a aquisição de dados da trajetória no próprio software. Via software também é possível configurar o tipo de acoplamento ao eixo do motor de forma que as unidades a serem trabalhadas sejam de acordo com a aplicação. Para o caso da tocha desenvolvida, o rolete é acoplado diretamente ao eixo do motor. O diâmetro relevante (diâmetro da cavidade que aloja o arame) é de 14,7 mm, de modo que a velocidade linear (velocidade de arame) é calculada automaticamente após a configuração no WorkBench. A Figura 4.5 mostra a interface de configuração do tipo de acoplamento contida no software WorkBench para a adequação de unidades.

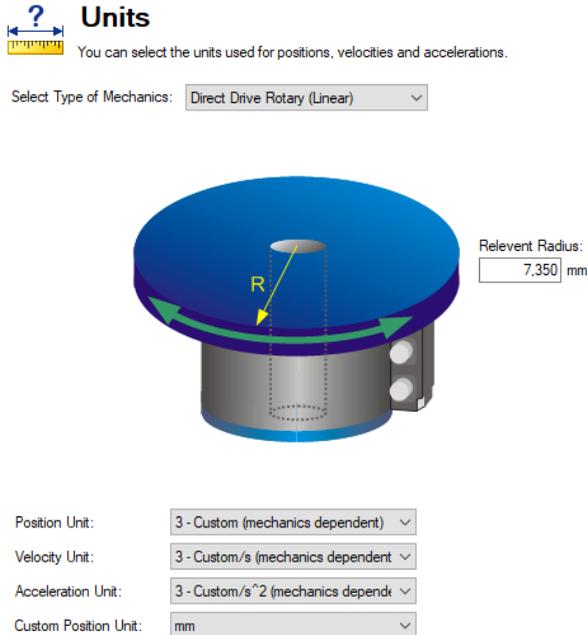


Figura 4.5 – Tela de configuração do tipo de acoplamento no software WorkBench.

Os sinais de controle a serem enviados para o servo *drive* são do tipo *step* e *dir* (passo e direção). São sinais digitais fornecidos por portas do microcontrolador da fonte de soldagem. Desse modo, o comportamento do sistema de acionamento é semelhante a um motor de passo. O sinal de *step* representa a quantidade de “passos” a ser dada pelo motor. A frequência deste sinal determina a velocidade em que os passos devem ser executados. Foi definido ainda uma resolução de 0,2 mm para cada passo. Assim, a relação de passos (r_p) foi calculada, através da Equação 4.1, resultando em 231 passos por volta, aproximadamente. Este valor também é configurado no WorkBench. Já o sinal *dir* representa o sentido de giro do eixo, resultando no movimento de avanço ou recuo do arame.

$$r_p = \frac{2 \cdot \pi \cdot 7,35}{0,2} \approx 231 \quad 4.1$$

Para a sintonia do controle é necessário o conhecimento dos elementos que compõem a grande malha fechada. Uma malha de controle

fechada contém os elementos necessários para um determinado sistema responder adequadamente conforme foi projetado. Uma malha é composta, basicamente, por controlador, sensores, atuadores e os sinais entre esses elementos. Em sistemas de deslocamento, como o sistema de alimentação de arame de equipamentos de soldagem, existem três malhas: a malha de posição, a de velocidade e a de torque. O conjunto dessas malhas forma a grande malha. Vale salientar que estas malhas não são independentes, são implementadas em cascata, conforme o diagrama da Figura 4.6.

A Figura 4.6 ilustra, de forma simplificada, o diagrama de blocos contendo as malhas de controle a serem trabalhadas para o controle do deslocamento de arame, atuando com o servomotor. Para a malha de controle de torque/corrente não é necessária a sintonia do controlador pois automaticamente o WorkBench identifica o modelo do motor conectado ao *drive* e ajusta o ganho para esta malha. A identificação do modelo do motor, bem como a leitura de velocidade instantânea é realizada pelo *Smart Feedback Device* (SFD), um tipo de *resolver* utilizado nos equipamentos do fabricante Kollmorgen.

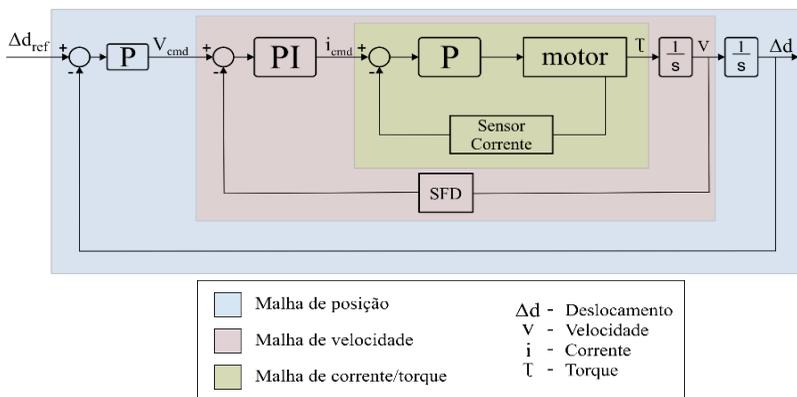


Figura 4.6 - Diagrama de blocos referente ao controle do servomotor.

Como principal especificação para o comportamento do sistema estabeleceu-se o menor tempo de assentamento possível, na ordem de 3,0 ms, para a malha de velocidade. Além disso, o sistema deve ser capaz de rejeitar perturbações externas e ser estável para executar o movimento em diferentes faixas de velocidade, até 0,833 m/s (50 m/min).

Para a sintonia do controle as recomendações do fabricante [40] foram seguidas e as especificações estabelecidas para o comportamento do sistema foram consideradas. Inicialmente, com o servomotor no modo

serviço, ajustou-se os parâmetros da malha de velocidade. O controlador resultante para esta malha foi do tipo proporcional-integral. Em seguida, ajustou-se o controlador da malha de posição somente com uma alta ponderação da ação proporcional, uma vez que a dinâmica integrativa das malhas internas já é o suficiente para garantir o erro nulo em regime permanente. Após o ajuste dos controladores o sistema foi submetido a dois ensaios, ambos com o arame sendo tracionado na tocha.

O primeiro ensaio é o teste de resposta ao degrau. O sistema foi submetido a uma mudança de referência de velocidade de 0 a 40 m/min e seu comportamento foi monitorado por meio da aquisição de sinais no WorkBench. A Figura 4.7 mostra o resultado deste ensaio destacando o tempo de assentamento de 95%. Vale ressaltar que a mudança de referência de velocidade do tipo degrau é aproximada por um movimento trapezoidal (soma de degraus no gráfico) uma vez que o sistema trabalha em controle de posição.

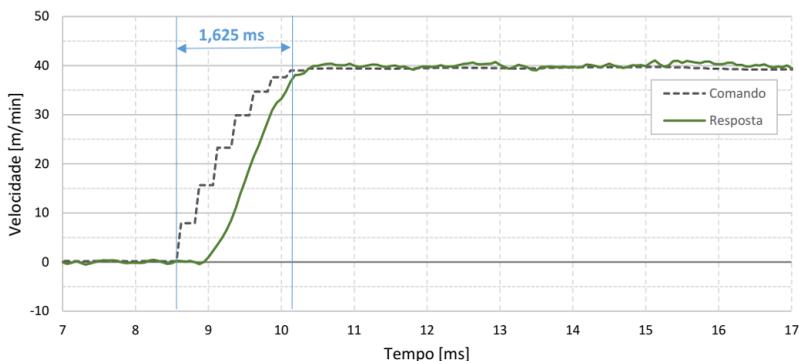


Figura 4.7 - Resposta do servoacionamento ao degrau após o ajuste dos controladores, destacando o tempo de assentamento.

Já o segundo ensaio procura simular a dinâmica do motor operando em uma frequência de inversão de 100 Hz. O perfil de movimento é ajustado no software de configuração, no modo de serviço, com os valores de velocidade e de tempo para cada etapa. Tanto para avanço quanto para recuo a velocidade de referência foi de 40,0 m/min, durante 5 ms. O resultado é apresentado na Figura 4.8.

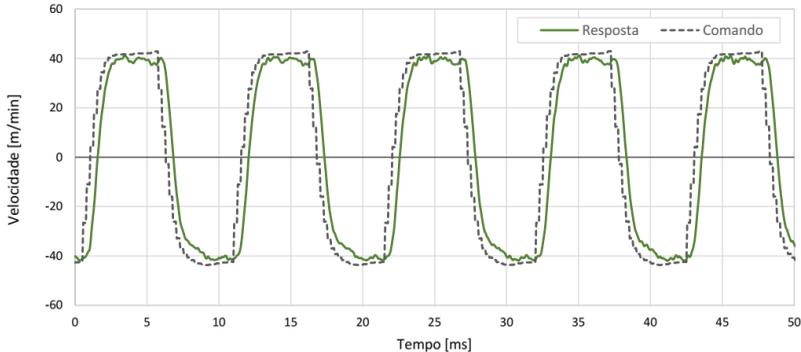


Figura 4.8 - Resposta do servoacionamento operando em modo de serviço em uma frequência de inversão de 100 Hz.

As figuras mostram que o sistema se comporta de forma satisfatória, considerando as especificações elencadas, mesmo em frequências de inversão altas.

Ao fim dessa etapa, a tocha desenvolvida foi considerada apta a compor um sistema de soldagem que faz uso da alimentação dinâmica. Dessa forma, a tocha foi integrada à fonte de soldagem, sendo comandada por meio de saídas digitais disponíveis no próprio microcontrolador da fonte, conforme elucidado anteriormente.

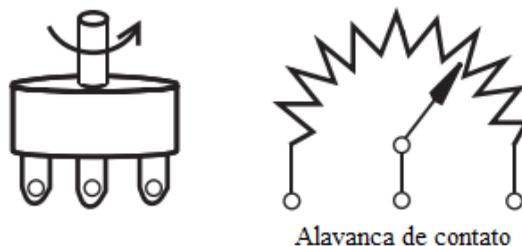
4.2 DESENVOLVIMENTO DO *BUFFER*

O desenvolvimento do pulmão envolve aspectos do sistema de medição bem como sua inserção no sistema de soldagem do MIG/MAG AD. Inicialmente, foi realizado um estudo considerando mecanismos simplificados para a medição de variação angular. Em seguida foi projetado um dispositivo, a partir da melhor solução disponível, com o qual foram conduzidos testes de forma a promover a integração do mesmo com a fonte de soldagem.

4.2.1 Mecanismos de Medição de Deslocamento Angular

O desenvolvimento do mecanismo de medição teve como referência a utilização de uma alavanca que transforma o deslocamento do arame dentro do *buffer* em movimento angular. A medição de posição angular pode ser realizada, de forma simples e de baixo custo, por um potenciômetro rotativo ou utilizando sensores de efeito Hall.

O potenciômetro rotativo é um dispositivo de resistência variável que consiste em um cursor que faz contato com um elemento resistivo e, à medida que esse ponto de contato se move, a resistência entre a alavanca e os terminais finais do dispositivo muda proporcionalmente ao deslocamento angular. A Figura 4.9 ilustra a forma e o esquema interno de um potenciômetro rotativo típico. Através da divisão de tensão, a mudança na resistência de um potenciômetro pode ser usada para criar uma tensão de saída que é diretamente proporcional ao deslocamento de entrada [41].



Alavanca de contato

Figura 4.9 – Esquemático de um potenciômetro rotativo.
Adaptado de [41].

Os sensores de efeito Hall são dispositivos que são ativados por um campo magnético externo. Um campo magnético possui duas características importantes: densidade de fluxo e polaridade (polos norte e sul). O sinal de saída, em forma de tensão, de um sensor de efeito Hall é função da densidade do campo magnético ao redor do dispositivo. O efeito de gerar uma tensão mensurável usando um campo magnético é chamado de Efeito Hall, homenagem a Edwin Hall, que o descobriu nos anos 1870 [42]. O princípio de funcionamento dos sensores de Efeito Hall está ilustrado na Figura 4.10.

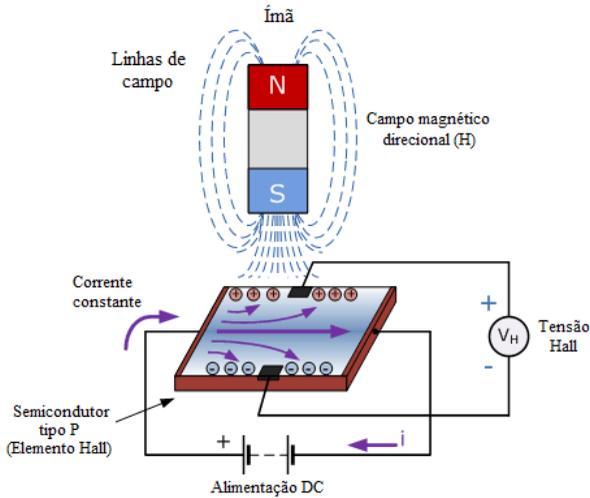


Figura 4.10 - Princípio de funcionamento dos sensores de Efeito Hall.
Adaptado de [43].

Os sensores de efeito Hall possuem vantagens sobre sensores eletromecânicos, uma vez que realizam medição sem contato, o que acarreta em menor necessidade de manutenção e menor desgaste do elemento sensível, possuem imunidade a vibrações e sujeira, quando devidamente embalado, e isolam ruídos elétricos. Em contrapartida, sensores de efeito Hall são suscetíveis a interferências de campos magnéticos de fontes externas.

A movimentação da alavanca no pulmão é promovida pela dinâmica de arame sendo alimentado e/ou consumido. Usualmente, em aplicações de soldagem, utiliza-se arames de 0,8 a 1,2 mm de diâmetro. Assim, a carga que se opõe ao movimento do arame no *buffer* deve ser mínima para que arames de pequenos diâmetros sejam capazes de promover o deslocamento da alavanca sem que sofram deformação causada por excesso de força. Frente a esta problemática, a construção de um mecanismo que realiza medição sem contato, ou seja, sem carga adicional, tal como proporcionada pelos sensores de efeito Hall, se torna mais indicada. Portanto, o projeto do mecanismo de medição foi concebido de modo a efetuar a leitura de deslocamento angular através de um sensor de efeito Hall.

4.2.2 Projeto do Mecanismo de Medição

O circuito integrado (CI) utilizado como transdutor foi o UGN3503 do fabricante Allegro. Este CI apresenta resposta linear amplificada e opera em uma faixa de tensão dependente da tensão de alimentação do circuito. A saída nula, correspondente à ausência de campo magnético ($B = 0 \text{ G}$), é nominalmente a metade da tensão de alimentação. Um polo sul magnético, presente na face destacada do sensor Hall, Figura 4.11, irá conduzir a saída acima do nível de tensão nulo. Um polo magnético norte irá conduzir a saída abaixo do nível nulo [44].

O dispositivo projetado contém uma cavidade que abriga o elemento sensível (CI de efeito Hall). Perpendicularmente a esta cavidade existe duas outras cavidades que alojam dois ímãs em formato cilíndrico. Estes dois ímãs são posicionados de tal forma que as faces circulares alinham e direcionam o campo magnético entre elas. Ao promover o deslocamento da alavanca, a direção do campo magnético em relação ao elemento sensível, que permanece estático, muda. Essa mudança é acusada na saída do sensor hall, em tensão, de forma proporcional ao deslocamento. A Figura 4.11 mostra, em transparência, o mecanismo projetado, o posicionamento dos ímãs e direção do campo magnético atuando no corpo do CI. Na imagem são destacados os ímãs (azul e vermelho) e a face do CI (verde) na qual se localiza o elemento sensível.

É importante salientar que o campo magnético no espaço entre os ímãs não muda de intensidade, somente de direção em relação ao elemento sensível. A variação de direção provoca um enfraquecimento aparente na face do CI. O campo magnético que antes era perpendicular à face, no exemplo da Figura 4.11-A, agora incide em um ângulo θ . Pode-se aproximar o modelo físico da leitura de acordo com o diagrama ilustrado na Figura 4.11-B, sendo a componente B_x do campo magnético responsável pela resposta do sensor hall. A componente B_y não contribui para a medição.

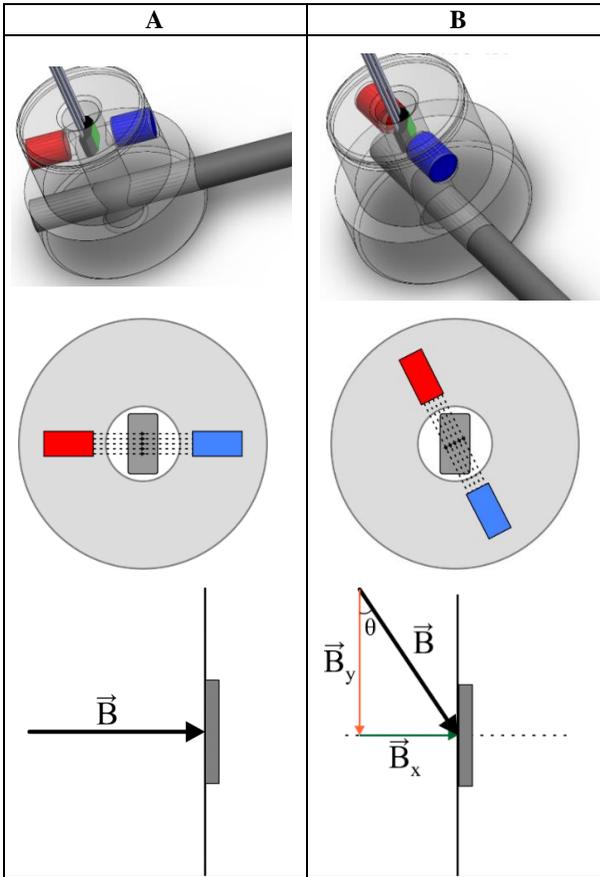


Figura 4.11 – Esquemático do funcionamento do mecanismo de medição. Posição relativa dos ímãs ao CI no estado inicial (A) e após o deslocamento da alavanca (B) e componentes do campo magnético.

A Figura 4.12 mostra o encapsulamento do mecanismo de medição projetado, destacando seus componentes principais. Na Figura 4.13 é apresentada a estrutura completa construída, em operação, que funciona como acoplamento entre os diferentes sistemas de acionamento do MIG/MAG AD.

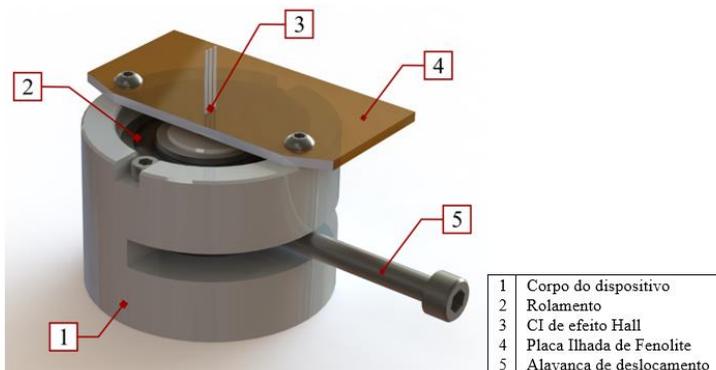


Figura 4.12 - Instrumento projetado para medição de deslocamento angular.

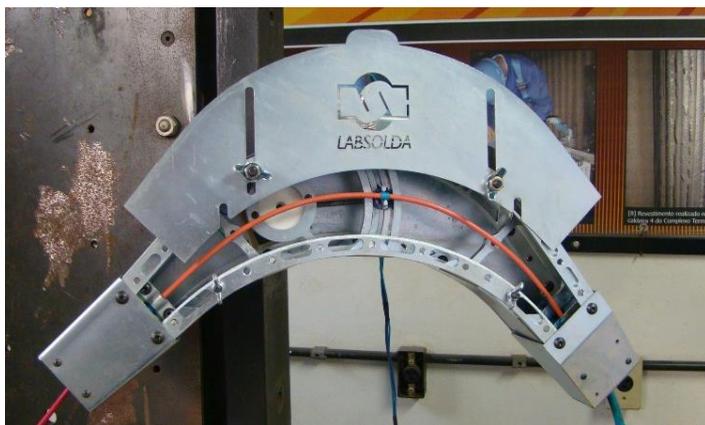


Figura 4.13 - Estrutura completa construída para o equipamento desacoplador.

4.2.3 Tratamento de sinais e Definição do Sistema de Controle

Conforme explicado nos tópicos anteriores, o mecanismo de medição adotado para a construção do *buffer* fornece a informação referente ao deslocamento angular da alavanca por meio de um sinal analógico de tensão. Para que a medição tenha efeito, dentro de um contexto de controle digital, é necessária a digitalização do sinal por meio da conversão AD.

A saída do sensor Hall está conectada a uma entrada analógica do microcontrolador ARM da fonte. O ARM realiza uma operação de conversão do sinal analógico em valores digitais, por meio de uma aproximação sucessiva [45]. O resultado dessa operação é um número inteiro de 10 bits, entre 0 e 1023, correspondente à fração de tensão, com relação à tensão de referência de 3,3 V, presente na entrada do conversor do microcontrolador. O intervalo de medição que o circuito é capaz de medir é de 0 a 3,3 V. Dessa forma, a menor variação de tensão que o conversor consegue distinguir (resolução) é de, aproximadamente, 3,22 mV.

A operação de conversão AD realizada pelo microcontrolador da fonte envolve componentes de hardware e de software. Um ensaio preliminar foi realizado de modo a avaliar o processo de conversão como um todo antes de inserir o transdutor no sistema. O objetivo deste ensaio é testar o circuito que compõe o hardware da fonte de soldagem, assim como as rotinas de conversão e tratamento de dados executadas pelo software.

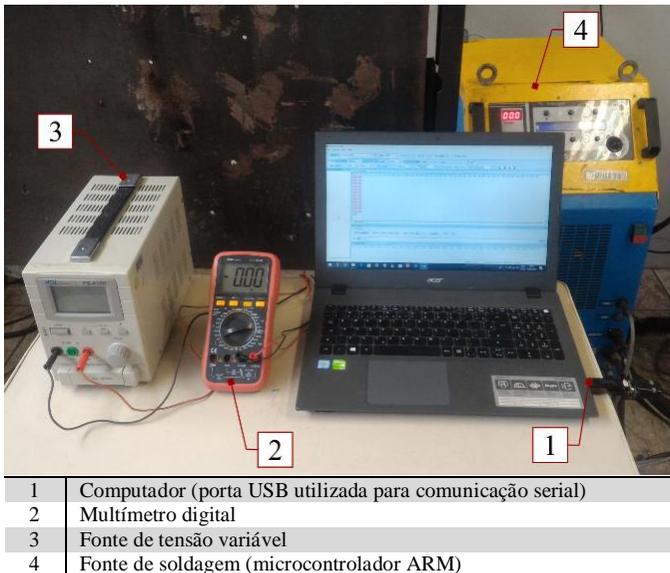


Figura 4.14 – Equipamentos para conversão AD na fonte de soldagem.

Para a realização desses ensaios utilizou-se uma fonte de tensão variável cujos terminais foram conectados diretamente nos pontos da entrada analógica da fonte de soldagem. Variou-se a tensão de 0,0 V até

3,0 V em intervalos de 0,5 V e, após a conversão AD da fonte, o dado foi enviado via comunicação serial para um computador. Para certificar os valores de tensão entre os terminais da fonte de soldagem foi utilizado um multímetro digital. A Figura 4.14 apresenta os equipamentos utilizados neste ensaio.

Pela análise da resposta da operação de conversão, exibida na Figura 4.15, pode-se concluir que o circuito de conversão respeita a linearidade esperada no procedimento. Assim, a utilização deste conversor como parte integrante do sistema de medição não exercerá influência no resultado dos cálculos da lei de controle.

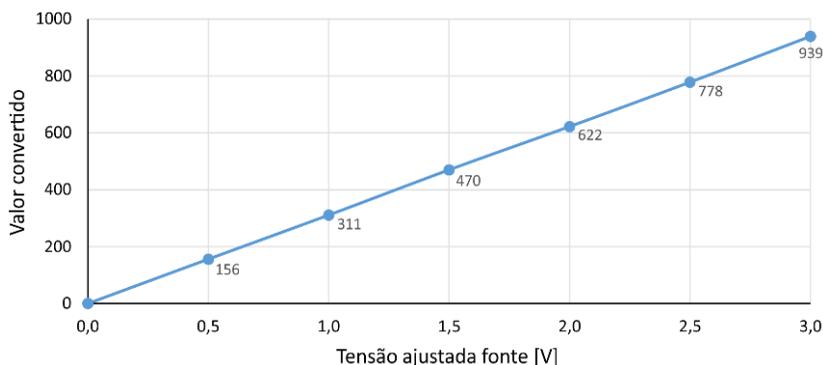


Figura 4.15 – Resultado da conversão AD

Em seguida, o dispositivo de medição projetado, juntamente com seu respectivo circuito de adequação de sinais e proteção do elemento sensível, foi inserido no sistema e um novo conjunto de ensaios foi realizado. O objetivo deste ensaio é relacionar a posição angular da alavanca presente no *buffer* com o valor convertido pelo microcontrolador.

Com o auxílio de um transferidor, a posição da alavanca foi ajustada manualmente para as posições angulares 0° , 15° , 30° e 45° e o resultado da conversão foi obtido pela leitura do valor enviado ao computador, por meio da comunicação serial, de forma análoga aos ensaios anteriores. Na Figura 4.16 é indicada a posição definida como origem (0°), que é o ponto mínimo de deslocamento da alavanca.

A Figura 4.17 mostra o comportamento do processo de conversão a partir das posições angulares da alavanca. Adicionalmente, a figura indica a equação da melhor reta que aproxima a posição da alavanca de acordo com o valor convertido pelo ARM.

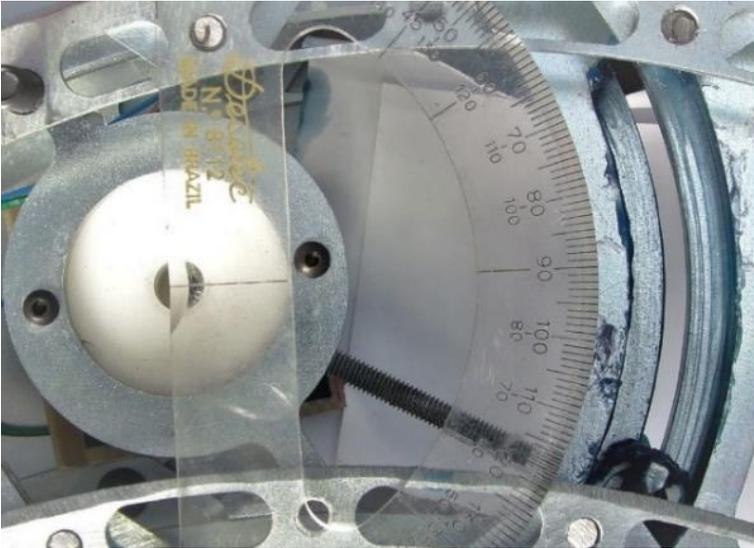


Figura 4.16 - Determinação da posição angular da alavanca presente no *buffer*. Na imagem é mostrada a posição considerada como a origem.

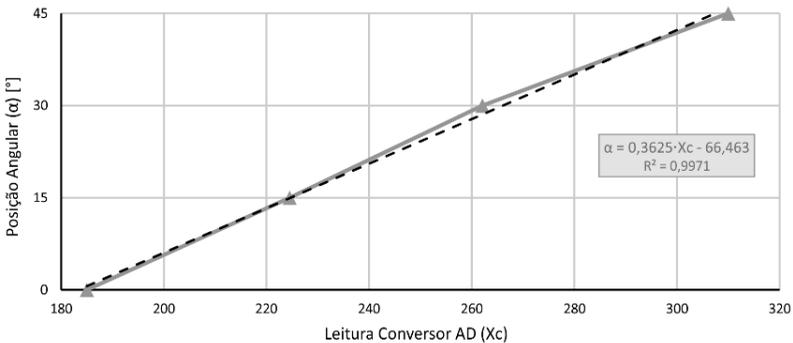


Figura 4.17 - Resultado da conversão AD com relação à posição da alavanca.

De posse das informações da conversão entre a posição angular da alavanca e o valor lido pelo software, seguiu-se para a definição do controle do acionamento secundário situado no cabeçote de arame.

Visando o projeto do controlador foram realizados testes de resposta ao degrau aplicado ao motor do tracionador do cabeçote. Por meio da programação de rotinas de testes no software da fonte de soldagem, foram aplicados diferentes níveis de velocidade de referência

como degrau (2,0 m/min, 5,0 m/min e 10,0 m/min). A resposta do motor foi monitorada pelo medidor de velocidade de arame presente no SAP. A análise dos dados obtidos permite a determinação da constante de tempo relacionada ao sistema de acionamento secundário e, através dos procedimentos de identificação de sistemas, foi levantada uma função de transferência de primeiro grau que aproxima a dinâmica do motor.

Com o auxílio de um software de simulação matemática (MATLAB) é possível realizar testes para determinar os parâmetros do controlador de forma simplificada. Dessa forma, a função de transferência, que representa o comportamento do motor ao longo do tempo, foi inserida em uma malha de controle fechada e um controlador com as ações proporcional e integral (PI) foi determinado de modo a rejeitar perturbações e atingir erro nulo em regime permanente. Houve a necessidade de se implementar também técnicas *anti-wind-up*¹ no sistema de controle devido à presença de saturações no atuador.

Após a definição do controlador, houve a necessidade de realizar a discretização do mesmo e definir a lei de controle a ser inserida no software da fonte de soldagem. A discretização também foi realizada com o auxílio do MATLAB, tendo aproximação para a discretização o método de Tustin (aproximação bilinear) e o período de amostragem (T_s) definido pelo tempo de acomodação de malha fechada, conforme a Equação 4.2.

$$T_s = \frac{t_s^{MF}(5\%)}{20} \quad 4.2$$

O resultado da simulação do sistema em malha fechada é apresentado na Figura 4.18 para uma referência do tipo degrau de 4,0 m/min de velocidade de arame ($t = 0,2$). Também foram inseridas perturbações no sistema de modo a avaliar a rejeição das mesmas pelo controle projetado. Foram adicionados um degrau de intensidade de -4 no instante $t = 1$ s e, em $t = 2$, um de intensidade 8,0 m/min.

¹ A saturação do atuador faz com que a malha seja “quebrada”, pois o atuador permanecerá em seu limite independentemente da saída do processo, contribuindo cada vez mais para o aumento do erro integral, que tende a “carregar-se” (*wind-up*).

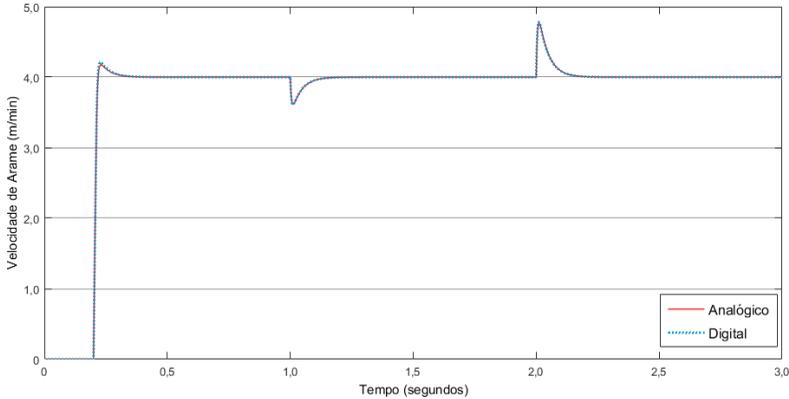


Figura 4.18 - Resposta do sistema de controle projetado nas versões analógico e digital.

Na Figura 4.18, tem-se a resposta do sistema para as versões analógica e digital. Observa-se que a digitalização foi adequada e o sistema digital se comporta de forma bem próxima do sistema analógico. Adicionalmente, o sistema foi capaz de rejeitar rapidamente as perturbações e seguiu a referência com erro nulo em regime permanente.

A partir dos resultados obtidos nas simulações, o controle foi implementado no software da fonte de soldagem, levando em consideração todos os detalhes determinados na fase de projeto.

Por fim, foram realizados ensaios de soldagem, com alimentação dinâmica, em diversas condições de velocidade média de arame com o sistema de controle implementado e atuando no cabeçote de alimentação secundária. Nestes ensaios, a leitura do sinal referente à posição da alavanca foi transmitida via comunicação serial para um computador. Na Figura 4.19 são expostos o sinal proveniente do conversor da fonte de soldagem, que representa a posição da alavanca, a velocidade em que o cabeçote alimenta arame ao sistema e a referência de posição para a alavanca, destacada no gráfico pela linha tracejada.

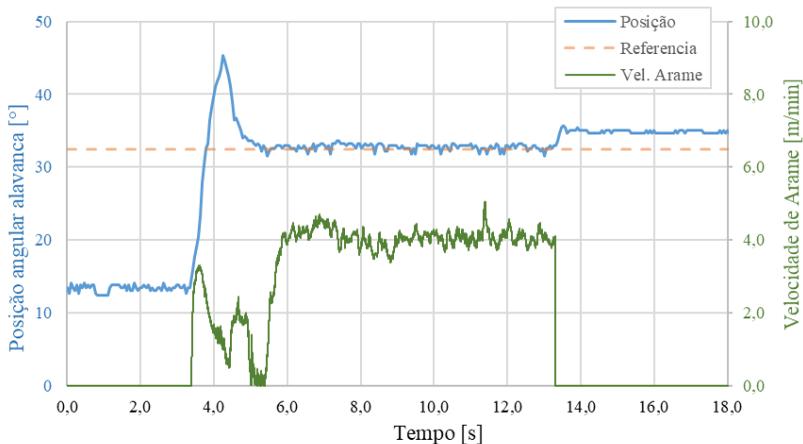


Figura 4.19 - Sinal de medição proveniente do mecanismo do *buffer* durante uma operação de soldagem e velocidade de arame do cabeçote.

Nota-se que o controle projetado apresentou um comportamento apropriado. No regime transitório, iniciado em torno do instante de 3,5 segundos, há um sobressinal esperado devido a dinâmica de abertura do arco. Durante a operação de regime permanente o sistema foi capaz de seguir a referência de posição estabelecida. Para o exemplo ilustrado, a velocidade de arame se manteve relativamente constante, em torno de 4,1 m/min. A posição de referência da alavanca foi definida como 32° e assim permaneceu para todos os ensaios realizados.

Ao longo dos diversos experimentos realizados não foram constatados eventos em que houvessem falhas na alimentação de arame causadas pelo sistema de controle desenvolvido.

4.3 DESENVOLVIMENTO DO SOFTWARE DE CONTROLE DO PROCESSO

A programação do software de controle do processo foi realizada em linguagem C++, utilizando a plataforma de desenvolvimento μ Vision - Keil. O código-fonte da máquina de solda foi disponibilizado pelo fabricante IMC Soldagem de forma que o programa do processo MIG/MAG AD fosse integrado ao algoritmo que já realiza o controle da fonte multiprocessado DigiPLUS A7.

Inicialmente, foi realizada a divisão do processo de soldagem baseando-se no sequenciamento de etapas de sua lógica de

funcionamento. A divisão do processo em etapas facilita a compreensão e o controle do mesmo. A primeira divisão, então, buscou distinguir as etapas de abertura, soldagem e de finalização do processo. Essa divisão é ilustrada na máquina de estados da Figura 4.20, considerando os eventos de transição entre as etapas.

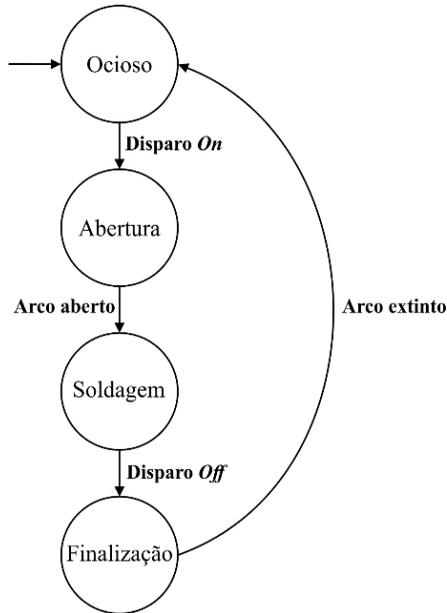


Figura 4.20 – Máquina de estados do funcionamento geral.

A etapa de abertura se faz necessária para levar o processo do estado inicial às condições necessárias para a realização da soldagem propriamente dita, sendo capaz de contornar possíveis falhas. A etapa de soldagem corresponde à lógica implementada para a composição das formas de onda de velocidade de arame e imposição da corrente, sendo esta a etapa responsável pelo controle da transferência metálica. Por fim, a etapa de finalização permite que o término do processo se dê de forma controlada, lógica e que possibilite o reinício do ciclo, evitando que o arame fique aderido ao material depositado, por exemplo.

A Figura 4.21 mostra a máquina de estados correspondente à etapa de abertura do processo. Esta etapa tem início a partir do sinal de disparo recebido pela fonte de soldagem, então o arame é comandado a avançar até que este entre em contato com a peça, momento em que a máquina detecta o curto-circuito. Ao detectar o curto, a fonte habilita o circuito de

potência e inicia a primeira rampa de corrente. Ao fim de um intervalo predeterminado de tempo a fonte monitora a tensão entre seus terminais e determina se a abertura do arco foi bem-sucedida ou não. Em caso negativo, o processo é reiniciado. Em caso positivo é imposta uma segunda rampa de corrente durante um intervalo de tempo predeterminado. Ao fim desta segunda rampa, o processo migra para a fase seguinte, a soldagem.

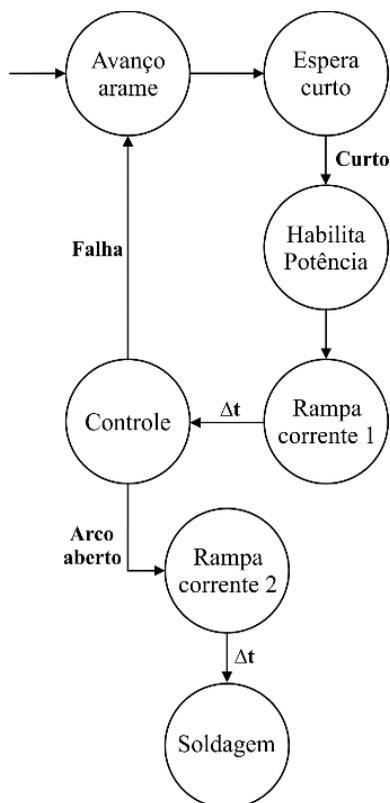


Figura 4.21 - Máquina de estados da etapa de abertura.

A etapa de soldagem é a etapa de regime do processo. Conforme descrito no capítulo 3, o processo MIG/MAG AD segue o formato de onda definido pela Figura 3.18. A máquina de estados apresentada na Figura 4.22 determina o comportamento do software enquanto o processo permanece neste estágio.

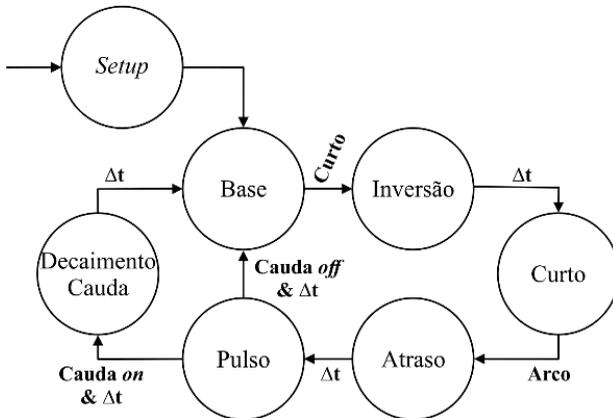


Figura 4.22 - Máquina de estados referente à etapa de soldagem.

O processo se inicia por uma fase de configuração que ajusta todas *flags* e variáveis necessárias para iniciar o procedimento. Logo em seguida, muda para etapa de base, onde o arame é conduzido no sentido de avanço e a corrente de base é imposta. O avanço do arame o conduz para o evento de curto-circuito. Quando este evento é detectado o processo migra para a fase de inversão do sentido de arame. A fase de inversão é sucedida pela fase de curto, na qual os patamares de corrente de curto são comandados. Nesta etapa, o sentido de movimento de arame é de retorno até o rompimento da ponte metálica e reabertura do arco elétrico, momento em que o software é redirecionado para a fase de atraso.

A fase de atraso foi inserida para dar maior flexibilidade para o usuário configurar o processo. Nesta fase pode ser configurado um atraso para a imposição da corrente de pulso, bem como o atraso para o comando do avanço do arame. O atraso para o comando de avanço é necessário, por exemplo, quando se deseja obter um maior nível de recuo do arame. Isso modifica, por consequência, o máximo comprimento de arco alcançado, o que pode acarretar diferentes resultados para a soldagem. Após o intervalo de tempo configurado no atraso ser concluído, o sistema migra para etapa de pulso, na qual o arame é avançado e a corrente de pulso é imposta. Findo o tempo de pulso, o processo pode seguir por dois caminhos distintos. O primeiro deles é o decaimento tipo cauda entre a corrente de pulso e a corrente de base. O segundo deles é diretamente a etapa de base, na qual a corrente de base é imposta sem decaimento programado e tem-se o reinício do ciclo.

O software permanece executando de acordo com a máquina de estados da etapa de soldagem até que o sinal de desligamento (disparo *off*) é recebido. Após o recebimento do sinal de finalização do procedimento, o sistema muda de etapa e passa a executar a etapa de finalização. Esta etapa é regida de acordo com a máquina de estado da Figura 4.23.

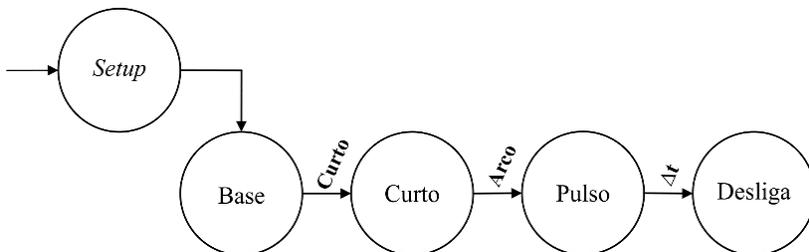


Figura 4.23 - Máquina de estados referente à etapa de finalização.

A finalização é, de forma geral, a repetição de um período de transferência da soldagem modificando a dinâmica de alimentação do arame. Inicialmente o software realiza as configurações necessárias para a execução da etapa. Em seguida é executado o patamar de base com o avanço do arame até a detecção do curto-circuito. A detecção deste evento faz com que o sistema comande o retorno do arame e promove a mudança para a etapa de pulso. Ao contrário do que ocorre na etapa de soldagem, a fase de pulso não comanda o avanço do arame para que não haja a possibilidade de o mesmo finalizar o processo aderido ao metal depositado. Ao fim do tempo de pulso o processo faz o desligamento da potência da fonte de soldagem e volta a máquina para o estado ocioso até o próximo disparo, conforme a Figura 4.20.

5 EQUIPAMENTOS E ENSAIOS DE AVALIAÇÃO DO PROTÓTIPO

Este capítulo trata de um estudo acerca do funcionamento de todas técnicas implementadas ao longo da construção do protótipo. São avaliados os resultados da lógica de controle e estratégias de cunho específico, que visam dar maior aplicabilidade ao processo e maior liberdade ao usuário.

Cada estratégia implementada requer uma análise específica de grandezas referentes ao momento no qual a estratégia se insere. Assim a avaliação foi dividida em etapas, conforme a Tabela 5.1. Cada etapa, por sua vez, possui sua metodologia específica para a execução de ensaios e para a análise dos dados levantados.

Tabela 5.1 - Etapas de avaliação das estratégias implementadas no desenvolvimento do processo MIG/MAG AD.

Etapa A	Controle de velocidade de avanço e recuo de arame
Etapa B	Controle do deslocamento do arame
Etapa C	Dinâmica de retorno do arame
Etapa D	Mergulho do arame na poça de fusão

5.1 EQUIPAMENTOS

O aparato experimental utilizado em todas as aplicações estudadas é descrito de forma geral nos tópicos seguintes.

5.1.1 Fonte de soldagem

Toda experimentação foi realizada utilizando a fonte de soldagem DIGIPlus A7, do fabricante IMC Soldagem, com capacidade de corrente de 600 A. A fonte conta com uma interface com o usuário na qual se inserem os parâmetros de entrada necessários para o processo. O modelo da fonte pode ser visualizado na Figura 5.1.



Figura 5.1 - Fonte de soldagem DIGIPlus A7.

O sistema de controle dessa fonte é baseado em um microcontrolador ARM7 de 32 bits. Tanto o software quanto a arquitetura de controle eletrônico da fonte foram abertos pelo fabricante e modificados para o desenvolvimento deste trabalho.

5.1.2 Dispositivos Manipuladores

Em cada ensaio foi necessária a movimentação do protótipo de tocha desenvolvido. Para a execução dos ensaios das etapas A, B e C foi utilizado o manipulador cartesiano Tartilope V2F, Figura 5.2-a, da empresa SPS-Soldagem. Para a execução dos ensaios da etapa D foi utilizado o robô antropomórfico HP20 da empresa Yaskawa-Motoman, Figura 5.2-b.



Figura 5.2 - Dispositivos manipuladores utilizados. a) Tartilope V2F.
b) Robô antropomórfico HP20.

5.1.3 Dispositivos de Medição e Monitoramento

O monitoramento das variáveis elétricas em processos de soldagem é de suma importância, pois serve como respaldo para levantar hipóteses e concluir acerca de eventos isolados e da transferência metálica em geral. Assim, a aquisição dos dados elétricos do processo, como tensão, corrente e velocidade de alimentação de arame, foi realizada utilizando o sistema de aquisição de dados portátil (SAP-4) da empresa IMC Soldagem. Este equipamento, mostrado na Figura 5.3, realiza a amostragem em uma taxa de 5,0 kHz, apresentando os valores na forma de oscilogramas e histogramas. Para a medição de corrente possui resolução de 0,8 A, para a medição de tensão de 0,1 V e para velocidade de arame de 0,1 m/min [46].

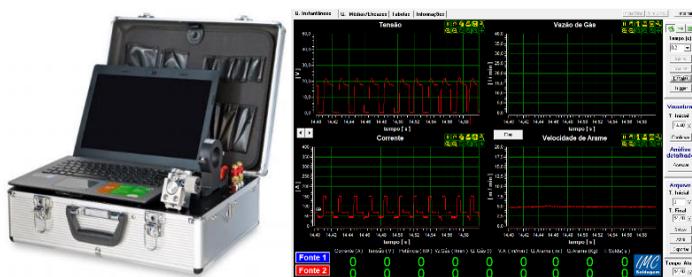


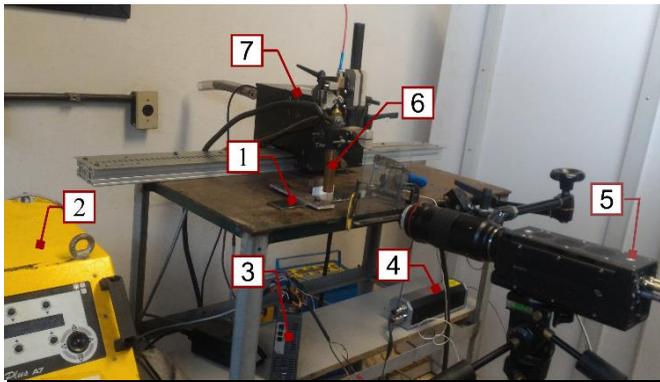
Figura 5.3 - Sistema de aquisição de dados portátil (SAP V4) dedicado à soldagem.

O recurso de filmagem em alta velocidade foi empregado visando avaliar em detalhes o comportamento do processo em desenvolvimento e permitir a medição de grandezas envolvidas na transferência metálica (velocidade de avanço e de retorno, tensão, corrente), além de outros parâmetros relevantes ao desempenho do protótipo em atividade (deslocamentos, distâncias, intervalos de tempo). A câmera utilizada é do fabricante IDT Vision, modelo Y4-S2. Concomitantemente à filmagem, realizou-se a aquisição de sinais elétricos do arco (tensão e corrente), e de controle do servomotor (*step* e *dir*). O equipamento responsável pela amostragem e sincronismo dos dados com as imagens é o módulo de aquisição de dados MotionPro DAS, também do fabricante IDT Vision.

Os sinais de tensão e corrente provenientes do processo de soldagem são lidos por transdutores específicos e condicionados para a faixa de leitura do MotionPro DAS por meio do instrumento TC-1, fabricado pelo LABSOLDA em parceria com a IMC Soldagem.

Uma das principais dificuldades relacionadas com a filmagem em alta velocidade da transferência metálica na soldagem a arco é a grande concentração de luminosidade na região de interesse. O alto grau de radiação do arco satura a imagem produzida pela câmera, exigindo que sejam adotadas medidas para contornar o problema. Como ferramenta auxiliar da filmagem foi utilizado um sistema de iluminação a laser do fabricante Cavitar. Esse equipamento pode operar com pulsos de laser de maneira sincronizada com a câmera de alta velocidade e, nessas condições, oferece uma potência de 500 W [1].

Os principais equipamentos que compõem o sistema de filmagem de alta velocidade, bem como suas respectivas especificações mais relevantes estão listados na Tabela 5.2. A bancada utilizada e disposição dos equipamentos para os experimentos podem ser visualizados na Figura 5.4.



1	Corpo de prova
2	Fonte de soldagem
3	Driver do servomotor Kollmorgen
4	Unidade de potência do laser
5	Câmera IDT de alta velocidade
6	Protótipo de tocha construído
7	Manipulador cartesiano de 2 eixos

Figura 5.4 - Bancada de ensaios e disposição dos equipamentos.

As medições objetivando a avaliação das técnicas de controle implementadas foram realizadas por meio do software de processamento e aquisição de imagens (Motion Studio), que acompanha o equipamento de filmagem de alta velocidade.

Tabela 5.2 – Equipamentos integrantes do sistema de aquisição de imagens e dados de alta velocidade.

Equipamento	Especificações principais
<p>Câmera IDT Y4-S2</p> 	<ul style="list-style-type: none"> - Resolução máxima 1024 x 1024 - Taxa de aquisição máxima (na resolução máxima) 5100 fps - Taxa de aquisição máxima (para resolução 1024 x 8) 165000 fps - Tempo de exposição mínimo 1 μs
<p>Sistema de Iluminação Laser Cavitar, CAVILUX HF</p> 	<ul style="list-style-type: none"> - Classe laser 4 - Potência de pulso 500 W - Tempo de pulso < 50 ns - Comprimento de onda 810 nm
<p>Sistema de aquisição de dados IDT, DAS MotionPro</p> 	<ul style="list-style-type: none"> - Canais de entrada analógica 16 - Resolução conversor A/D 16 bits - Taxa de aquisição máxima 500 kHz - Faixa de tensão na entrada ± 10 V
<p>Medidor de tensão e corrente TC-1, IMC Soldagem</p> 	<ul style="list-style-type: none"> - Faixa de medição de tensão ± 60 V - Faixa de medição de corrente ± 500 A - Faixa de tensão saída analógica ± 10 V - Erro de medição (nominal) < 3%

5.2 ENSAIOS DE AVALIAÇÃO DO PROTÓTIPO

A avaliação das estratégias desenvolvidas foi realizada concomitantemente à etapa de desenvolvimento do software do processo, descrita no capítulo anterior. A realização destes ensaios objetivou dar suporte ao desenvolvimento do controle e software do processo MIG/MAG AD.

5.2.1 Etapa A - Controle de Velocidade de Arame

O controle de velocidade de alimentação de arame é de suma importância em processos de soldagem não autógenos. Pelo fato do processo MIG/MAG AD utilizar uma faixa de velocidade de alimentação instantânea muito maior que os processos MIG/MAG tradicionais, seu controle é de essencial importância para garantir a operabilidade do equipamento em toda área de potência e fornecer ao usuário a confiabilidade necessária para efetuar os mais diversos procedimentos.

Assim, os ensaios definidos como Etapa A tem como objetivo avaliar o controle de velocidade, tanto de avanço quanto de recuo do arame, observando se o sistema é capaz de seguir as referências estabelecidas pelo usuário como parâmetros de entrada.

5.2.1.1 Metodologia

Os ensaios conduzidos foram do tipo depósitos sobre chapas de aço carbono SAE 1020 de 3,0 mm de espessura em posição plana. Como material de adição foi utilizado o arame ER70S-6 de 1,2 mm de diâmetro. A proteção gasosa foi composta de uma mistura de 25% de CO₂ e 75% de argônio a uma vazão ajustada em 15 l/min.

O levantamento de dados foi realizado por meio da filmagem de alta velocidade do rolete tracionador de arame, situado no corpo da tocha de soldagem. Uma marcação foi inserida no topo do rolete, Figura 5.5, para que o deslocamento angular pudesse ser acompanhado visualmente e mais facilmente identificado pelo software de tratamento de imagens. A taxa de aquisição de quadros foi definida em 5000 *fps*.

Os parâmetros referentes à velocidade utilizados para cada ensaio são apresentados na Tabela 5.3, sendo V_{ap} a velocidade de avanço no pulso, V_{ab} de avanço na base e V_r a velocidade de recuo. A velocidade máxima foi definida em 50 m/min devido às limitações de potência do servomotor delineadas em ensaios prévios.

Tabela 5.3 – Parâmetros de velocidade para os ensaios de avaliação do controle de velocidade (Etapa A).

	Vap (m/min)	Vab (m/min)	Vr (m/min)
Ensaio A1	10,0	10,0	10,0
Ensaio A2	20,0	20,0	20,0
Ensaio A3	35,0	35,0	35,0
Ensaio A4	50,0	50,0	50,0
Ensaio A5	30,0	15,0	30,0
Ensaio A6	20,0	40,0	20,0
Ensaio A7	25,0	25,0	50,0

Os demais parâmetros necessários à execução do processo permaneceram inalterados, nesta avaliação, e podem ser observados na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Parâmetros de soldagem utilizados em todos ensaios da Etapa A.

Parâmetro	Valor
Ipa	250 A
Iba	75 A
Ic	50 A
tpa	2,5 ms
cArc	2,0 mm

A partir da sequência de imagens obtida, foi utilizada a ferramenta de *track* disponível no software Motion Studio. O *track* é um recurso do software que permite a marcação de pontos bem definidos nas imagens e o software realiza o seguimento deste ponto de forma automática. O resultado desse procedimento é uma tabela de pontos cartesianos referentes à posição do ponto demarcado em cada *frame*. Como exemplo, na Figura 5.5 é mostrado o rolete tracionador de arame da tocha com uma marcação para detecção dos pontos pelo software. Ainda na figura, pode-se observar em amarelo o ponto central do rolete, utilizado como referência nos cálculos de deslocamento, e o ponto mais afastado em vermelho.

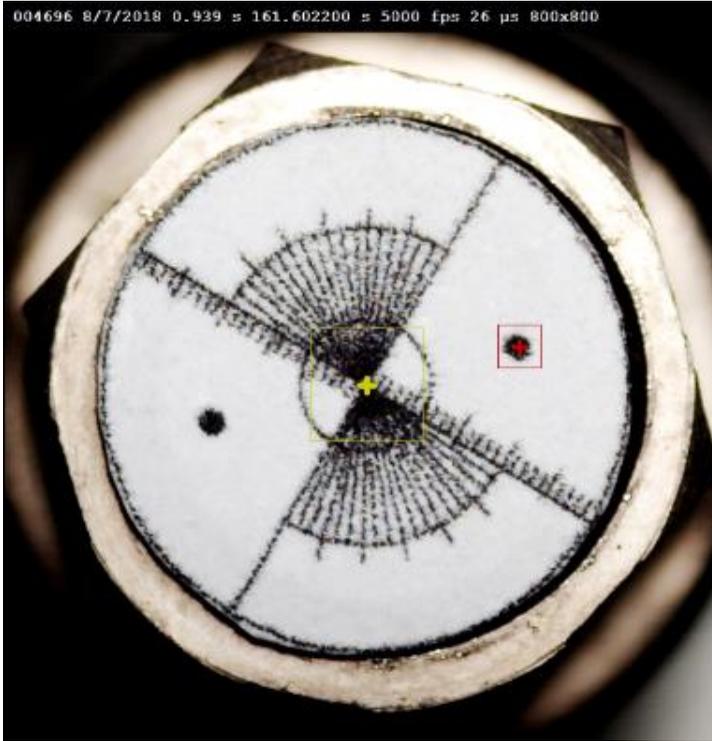


Figura 5.5 - Exemplo da utilização da ferramenta *track* do Motion Studio. Ponto utilizado como referência do centro do movimento em amarelo e para deslocamento angular em vermelho.

O ponto demarcado em vermelho fornece a informação de deslocamento angular. A partir da tabela fornecida pelo *track* é necessário o ajuste desse ponto para um novo sistema de referência cartesiano no qual o centro do rolete é a origem do sistema. Essa transformação é ilustrada na Figura 5.6, onde a linha tracejada delimita a região da imagem. Na Figura 5.6-A tem-se o sistema cartesiano que o software utiliza e, na Figura 5.6-B, o novo sistema centrado no rolete da tocha que serviu como referência para os cálculos.

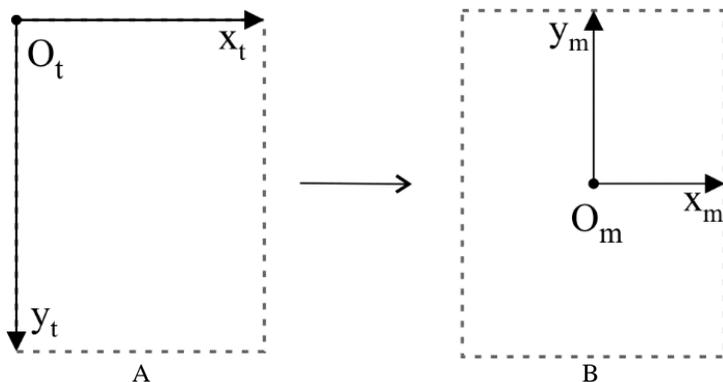


Figura 5.6 – Transformação de referência cartesiana realizada.
A: Sistema cartesiano utilizado pelo Motion Studio; B: Sistema cartesiano utilizado no cálculo de deslocamento angular.

Após a mudança de referência, utiliza-se princípios da trigonometria para o cálculo do ângulo do ponto demarcado em cada frame (θ_f) em relação ao eixo das abscissas, conforme a Equação 5.1.

$$\theta_f = \tan^{-1} \left(\frac{y_f}{x_f} \right)$$

Com a informação referente à posição angular de cada ponto pode-se estabelecer a variação angular entre frames. Esta variação, por sua vez, é utilizada para o cálculo da velocidade instantânea tendo como base o intervalo de tempo entre os frames.

5.2.1.2 Resultados e Discussões

Os vídeos referentes a esta etapa foram agrupados e disponibilizados para acesso através do *QR Code* da Figura 5.7.



Figura 5.7 - Link de acesso aos vídeos da Etapa A.

A execução dos ensaios propostos e o posterior tratamento de dados provenientes das imagens forneceram os valores referentes às velocidades de arame instantâneas do MIG/MAG AD em operação. A Figura 5.8 reúne os dados referentes aos ensaios de A1 a A4. Nestes ensaios toda as referências de velocidade foram ajustadas em valores iguais e foram sendo aumentadas de forma gradativa de ensaio em ensaio, conforme a Tabela 5.3.

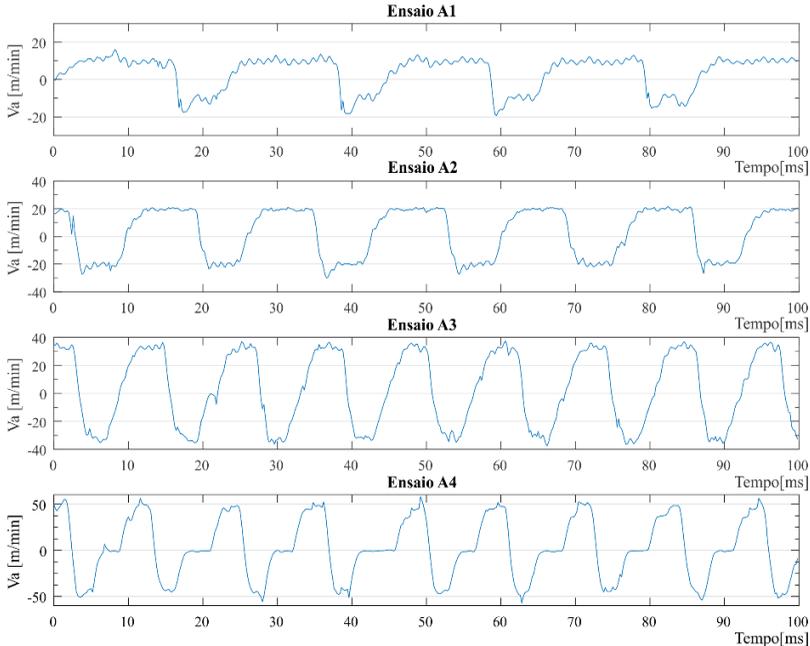


Figura 5.8 – Perfil de velocidade de arame durante a transferência metálica referentes aos ensaios de A1 a A4.

Analisando cada gráfico apresentado na Figura 5.8, pode-se concluir acerca do desempenho do sistema de controle de velocidade implementado no processo. A alimentação de arame atinge a velocidade de referência em todos os casos. Para referências menores é mais nítido o desempenho do sistema no que diz respeito ao comportamento em regime permanente. Nestes mesmos ensaios também pode-se notar a presença de um sobressinal na porção negativa de velocidade, na inversão do movimento. Esse sobressinal é resultado do desenvolvimento de uma técnica para acelerar o recuo, a ser detalhada na Etapa C deste conjunto de ensaios.

Observa-se que o período de transferência decresce conforme aumenta-se a velocidade de avanço e de recuo, como esperado. Os dados referentes aos tempos médios de arco, de curto, período de transferência e frequência desses ensaios foram agrupados na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 - Tempos médios de arco, curto-circuito, período e frequência de transferência.

	Velocidades [m/min]	Tempos médios [ms]			Frequência [Hz]
		Arco	Curto	Período	
Ensaio A1	10,0	3,9	17,7	21,6	46,3
Ensaio A2	20,0	4,8	11,7	16,5	60,6
Ensaio A3	35,0	4,9	7,0	11,9	84,0
Ensaio A4	50,0	4,4	5,4	9,8	102,0

Ainda com relação à Figura 5.8, os resultados do Ensaio A4 revelam que o sistema permanece estático por curto intervalo de tempo após o recuo. Como a distância que o arame recua é a mesma em todos estes ensaios (2,0 mm), quando este movimento é executado em maiores velocidades, naturalmente o intervalo de tempo de deslocamento é menor, resultado também evidenciado na Tabela 5.5 pelo menor tempo de curto. Assim, o arame aguarda o rompimento da ponte metálica parado até receber a instrução seguinte.

Visando observar esta ocorrência, foi realizada a filmagem em alta velocidade da região do arco para esse mesmo ensaio. O detalhamento da parada do arame foi acompanhado por meio do Motion Studio e foram demarcados pontos de referência no período de transferência de modo a esclarecer o perfil de velocidade observado. Este detalhamento é exposto na Figura 5.9 juntamente com o *frame* correspondente ao arame parado aguardando a ruptura da ponte metálica por tensão superficial.

Na parte inferior da Figura 5.9 é destacado o conjunto de eventos relevantes à situação explorada. O quadro de número 1 indica o instante em que o envio da sequência de pulsos pelo microcontrolador é finalizada. Em seguida, no quadro número 2, é apontado o momento em que o arame para, de fato. Este é o momento ilustrado no *frame* que acompanha a imagem. No quadro de número 3 é indicado o instante em que a tensão do processo cresce, indicativo do rompimento da ponte metálica e a reabertura do arco. Por fim, no quadro de número 4, é indicado o começo da nova sequência de pulsos que coordena o avanço do arame para reinício do ciclo.

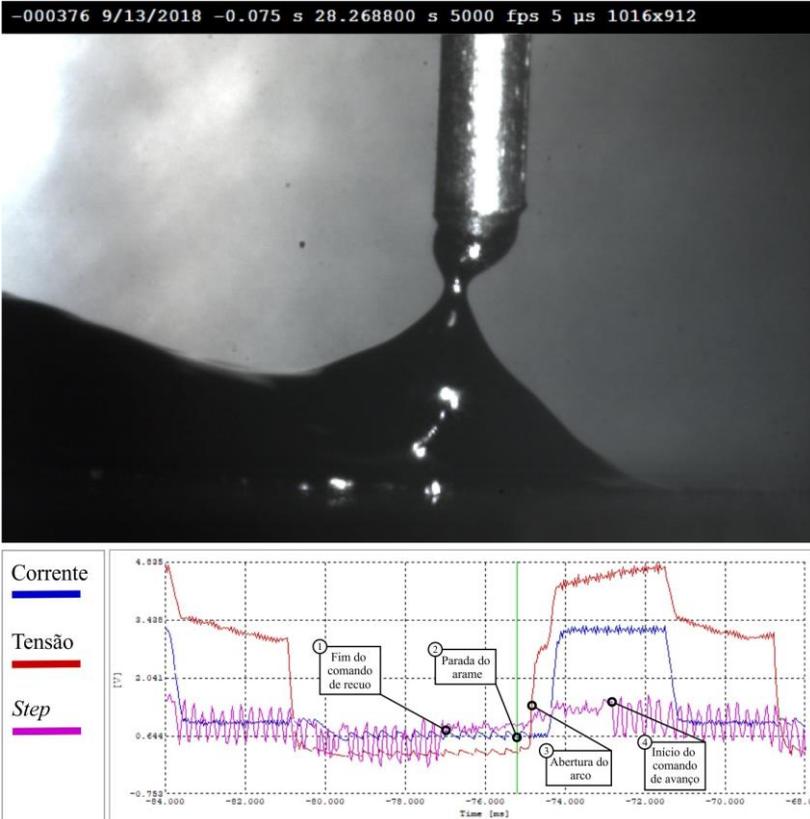


Figura 5.9 - Detalhamento da pausa na movimentação do arame referente ao Ensaio A4.

Nos experimentos seguintes, foram definidas velocidades diferentes para diferentes fases do período de transferência: velocidade de avanço no pulso (V_{ap}), velocidade de avanço na base (V_{ab}) e velocidade de recuo (V_r) durante a etapa de curto-circuito. Os ensaios conduzidos apresentaram os resultados de acordo com a Figura 5.10.

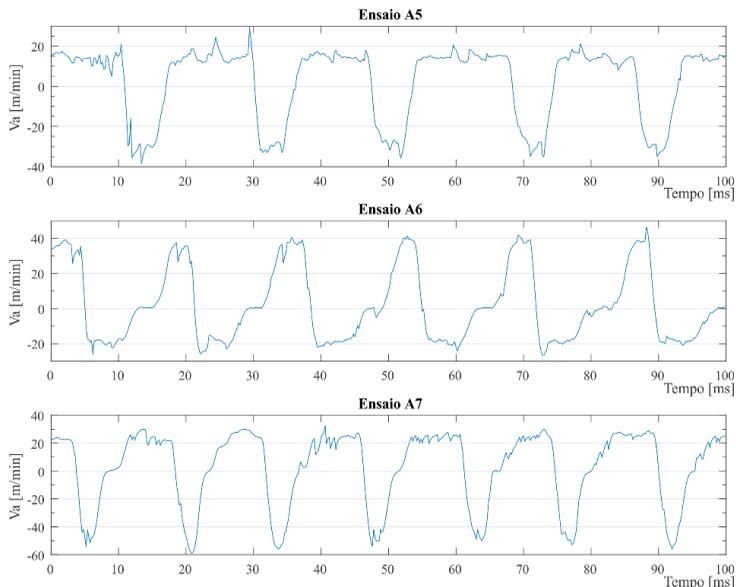


Figura 5.10- Perfil de velocidade de arame durante a transferência metálica referentes aos ensaios de A5 a A7.

Os resultados desse conjunto de ensaios confirmam o funcionamento do sistema de controle de velocidade desenvolvido. Entretanto, vale ressaltar que o curto intervalo de tempo regulado para o pulso de corrente, de 2,5 ms, não permitiu que o sistema atingisse a velocidade ajustada para esta etapa (parâmetro V_{ap}). Assim, nestes ensaios, a velocidade de avanço seguiu somente a referência ajustada como velocidade na etapa de base (parâmetro V_{ab}).

5.2.1.3 Conclusões da Etapa A

Os resultados reportados nesta análise embasam o desempenho adequado do sistema de controle de velocidade de arame. Pode-se afirmar que a velocidade ajustada na IHM foi seguida em todos ensaios.

Sobre o processo de medição de velocidade baseado na diferença entre quadros de imagens pode-se argumentar que há a geração ruídos na resposta, mais evidenciados na Figura 5.10, o que agrega algumas incertezas adicionais associadas ao processo de medição. Estas incertezas estão relacionadas, por exemplo, ao posicionamento do marcador no rolete de forma não totalmente centralizada e à identificação dos pontos por meio da ferramenta *track* do software de análise.

5.2.2 Etapa B - Controle de Deslocamento

A etapa definida como Etapa B tem como objetivo avaliar a atuação do controle do deslocamento do arame. Do ponto de vista do processo MIG/MAG AD, o deslocamento do arame a partir do curto-circuito até a posição máxima do movimento de recuo pode ser considerado como o comprimento do arco. Uma vez que este parâmetro é de suma importância em procedimentos de soldagem, é necessário que o seu controle atinja uma performance satisfatória, de modo que não haja variações do mesmo entre períodos de transferência em um mesmo procedimento.

5.2.2.1 Metodologia

Os ensaios conduzidos foram do tipo depósitos sobre chapas de aço carbono SAE 1020 de 3,0 mm de espessura em posição plana. Como material de adição foi utilizado o arame ER70S-6 de 1,2 mm de diâmetro. A proteção gasosa foi composta de uma mistura de 25% de CO₂ e 75% de argônio a uma vazão ajustada em 15 l/min.

O conjunto de ensaios realizados nessa etapa visa variar o parâmetro referente ao comprimento de arco (cArc) e observar, por meio da filmagem em alta velocidade, o efeito no recuo do arame. A velocidade do movimento também foi variada a fim de verificar se há alguma influência no comprimento do arco. Os parâmetros principais para a execução destes ensaios são expostos na Tabela 5.6.

Tabela 5.6 - Parâmetros principais dos ensaios para avaliação do controle de deslocamento (Etapa B).

	Vap, Vab e Vr (m/min)	cArc (mm)	Ipa (A)	Iba (A)	Ic (A)	tpa (ms)
Ensaio B1	40,0	2,0	250	75	50	2,5
Ensaio B2	40,0	3,0	250	75	50	2,5
Ensaio B3	40,0	5,0	250	75	50	2,5
Ensaio B4	20,0	2,0	250	75	50	2,5

A gravação de imagens com a câmera de alta velocidade foi realizada em uma taxa de 5000 *fps*. A aquisição de dados foi realizada em quatro canais: tensão, corrente, *step* e *dir*. Os dois primeiros sinais são referentes ao arco elétrico e os dois últimos são referentes ao controle do movimento do servomotor. A taxa de aquisição de sinais elétricos foi configurada em 100 kHz.

Como forma de avaliar o resultado dos ensaios, a medição do deslocamento foi realizada por meio de um software de edição de imagens (Photoshop) utilizando os *frames* que representam os pontos de início e de fim do movimento de recuo, ou seja, os pontos extremos do movimento. A partir da definição de uma escala de medição baseada em uma distância conhecida (diâmetro do eletrodo de 1,2 mm), é possível realizar medições na imagem utilizando as ferramentas do próprio software. Esse processo de medição é ilustrado na Figura 5.11 para um par de amostras de imagens.



Figura 5.11 - Processo de medição com os *frames* extremos do movimento de recuo do arame: início (esquerda) e fim (direita).

O resultado desse processo levará em consideração um tratamento estatístico baseado em um conjunto de dez amostras de pares utilizados na medição. São colhidas amostras de pares do início, meio e fim do vídeo para uma melhor representatividade dos dados para o processo sob a perspectiva estatística.

5.2.2.2 Resultados e Discussões

O *frame* inicial do movimento de recuo foi comparado ao *frame* final deste mesmo movimento, como mostra a Figura 5.11. A partir da imagem obtida com os quadros lado a lado traça-se linhas horizontais como referência e, em seguida, efetua-se a medição com as ferramentas do software de edição de imagens. Esse procedimento é exibido na Tabela 5.7, expondo os *frames* utilizados para uma amostra de cada ensaio, juntamente com o resultado da medição de um conjunto de 10 amostras. Na tabela também são apresentados os *QR Codes* dos vídeos em alta velocidade de cada ensaio.

Na Figura 5.12, esse mesmo resultado é representado por diagramas de caixa, nos quais a linha vermelha representa a mediana da amostra, os valores extremos são caracterizados pelos traços (*whiskers*) superiores e inferiores e a caixa azul delimita o primeiro e o terceiro quartil. Não foram evidenciados valores discrepantes em nenhuma das amostras.

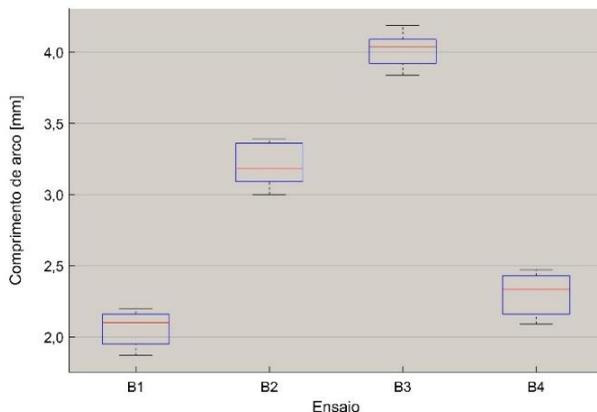


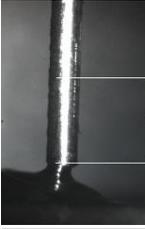
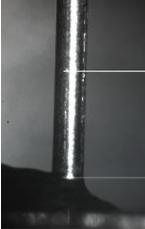
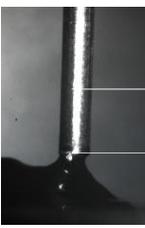
Figura 5.12 – Resultado da medição de comprimento de arco para os ensaios da etapa B.

Com relação ao ensaio B1, pode-se admitir que o mesmo atinge o valor predeterminado de forma satisfatória. A média da amostra é de 2,06 mm, com um desvio padrão de 0,12 mm (6%). Já o ensaio B2 não atinge o comportamento esperado, entretanto a faixa de valores dentro da qual a amostra varia se encontra bastante próxima do valor desejado. A média desta amostra é de 3,21 mm e o desvio padrão de 0,14 mm (4%).

O ensaio B3 apresentou média de 4,01 mm e desvio padrão de 0,11 mm (3%). O comprimento de arco de referência para este ensaio foi de 5,0 mm, entretanto observa-se que esta referência não pôde ser atingida. Este comportamento advém da limitação temporal intrínseca ao funcionamento do processo. Essa limitação pode ser explicada com o auxílio da aquisição de dados, referente ao ensaio em questão, exposta na Figura 5.13².

² Os gráficos da Figura 5.13, assim como os gráficos da Figura 5.14, mostram os valores em tensão para todas as grandezas antes de serem ajustados para a faixa de medição de cada canal e convertidos nas respectivas unidades. São os dados diretamente dos transdutores em cada canal do DAS.

Tabela 5.7 – Resultado de medição das amostras para cada ensaio da etapa B.

Ensaio B1 (cArc = 2,0 mm)			
Início	Fim	Medição amostras	Vídeo
		2,06 mm $\sigma = 0,12$ mm (6%)	
Ensaio B2 (cArc = 3,0 mm)			
Início	Fim	Medição amostras	Vídeo
		3,21 mm $\sigma = 0,14$ mm (4%)	
Ensaio B3 (cArc = 5,0 mm)			
Início	Fim	Medição amostras	Vídeo
		4,01 mm $\sigma = 0,11$ mm (3%)	
Ensaio B4 (cArc = 2,0 mm)			
Início	Fim	Medição amostras	Vídeo
		2,31 mm $\sigma = 0,14$ mm (6%)	

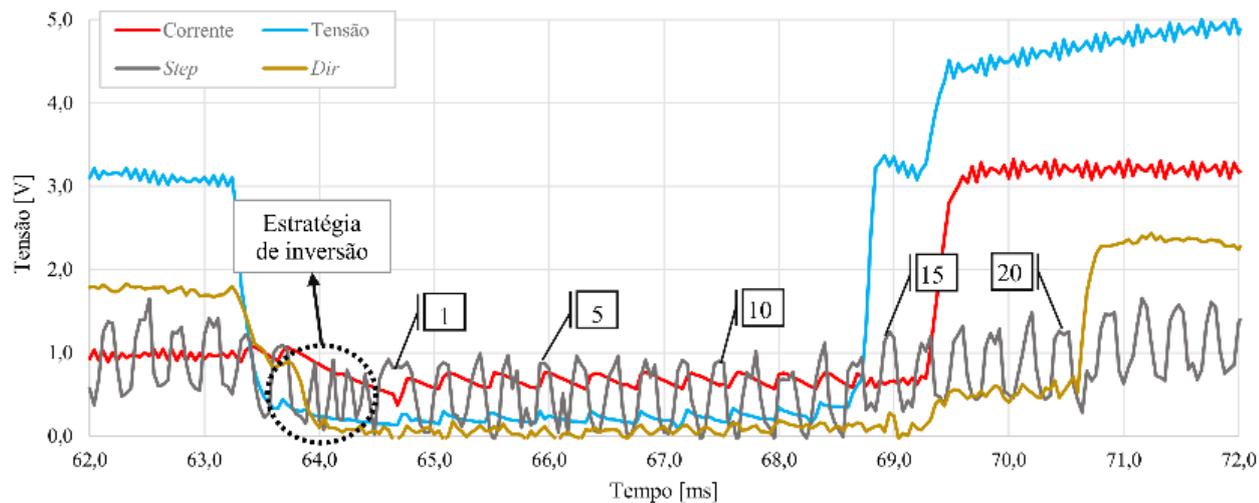


Figura 5.13 - Número de pulsos do sinal de *step* para o movimento de retorno do arame referente ao ensaio B3.

Na Figura 5.13 são enumerados os pulsos referentes ao controle do deslocamento do arame, considerados pelo número de bordas de subida. Em síntese, o sistema de controle é configurado de forma que cada pulso representa um deslocamento de 0,2 mm. Assim, os vinte pulsos recebidos durante o recuo representariam um deslocamento total de 4,0 mm, o que condiz com os resultados reportados na Figura 5.12. Apesar do processo estar configurado para enviar 25 pulsos para o servoacionamento (quantidade de pulsos correspondente a 5,0 mm), não há tempo suficiente para o microcontrolador enviar os pulsos dentro da janela temporal disponível. Essa janela de tempo é resultado da combinação entre parametrização do procedimento e a forma que o software foi concebido.

Como o objetivo desta etapa é analisar o controle de deslocamento do sistema, o resultado do ensaio B3 não foi um empecilho para a avaliação e conclusão acerca do funcionamento do sistema de controle, contrariamente, os resultados encontrados reforçam a avaliação positiva do mesmo.

A estratégia de inversão, destacada na Figura 5.13, consiste em uma curta sequência de pulsos em uma frequência mais elevada. Esta estratégia é abordada na etapa seguinte em maiores detalhes. Vale destacar, entretanto, que há um indicativo desta estratégia influenciar no deslocamento do arame durante o retrocesso do mesmo em todos os ensaios conduzidos, conforme reportado na Figura 5.12. Esse indicativo é proveniente do fato de todas amostras apresentarem um deslocamento ligeiramente superior ao que foi ajustado para o procedimento, o que pode ser explicado pelo envio de pulsos adicionais que compõem a estratégia.

O ensaio B4 foi realizado com a metade da velocidade de avanço e de recuo que os demais ensaios desta etapa. Este ensaio apresentou média de 2,31 mm e desvio padrão de 0,14 mm (6%). Apesar da aparente diferença entre a referência e a média do comprimento de arco, foi verificado na aquisição de sinais que a sequência de pulsos enviadas pelo microcontrolador através do sinal de *step* está de acordo com o que foi ajustado. A Figura 5.14 mostra a comparação entre o ensaio B1 e o ensaio B4. Pode-se observar que a quantidade de pulsos recebidos a partir da estratégia de inversão é a mesma para ambos ensaios. A distinção entre eles é com relação à frequência dos mesmos. Para uma referência de velocidade maior, ensaio B1, a frequência é maior.

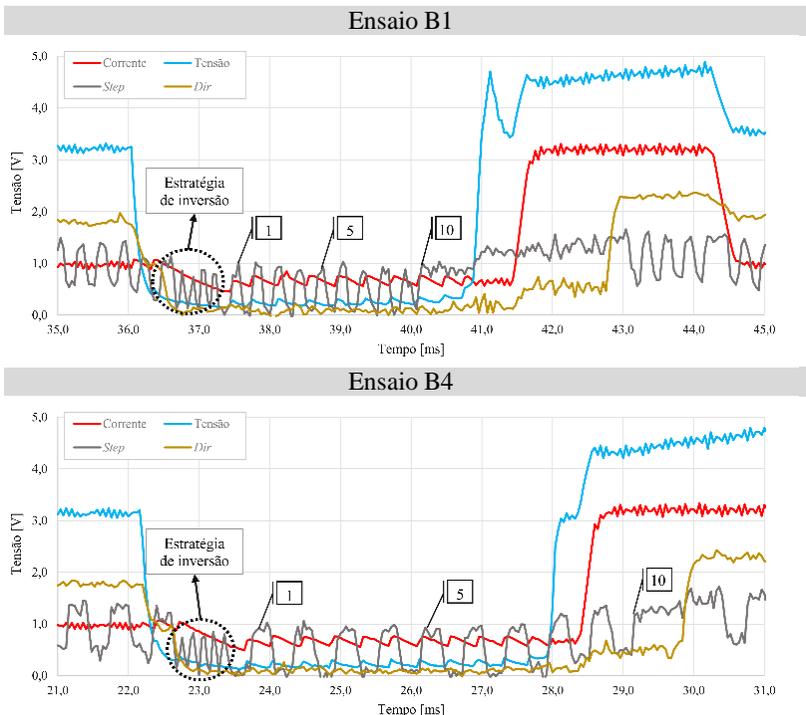


Figura 5.14 - Número de pulsos do sinal de *step* para o movimento de retorno do arame referente ao ensaio B1 (superior) e ao ensaio B4 (inferior).

Após a comparação exibida na Figura 5.14, levanta-se a hipótese de que a diferença entre os resultados no deslocamento no movimento de recuo dos ensaios B1 e B4 são influência da estratégia de inversão de movimento. Entretanto, pelo fato dessa diferença observada não ser significativa, a estratégia e funcionamento do sistema de controle de deslocamento desenvolvido foram considerados adequados para o prosseguimento das atividades do projeto.

5.2.2.3 Conclusões da Etapa B

A análise do resultado do controle de deslocamento implementado permite afirmar que o sistema de controle envia a quantidade de pulsos correta para determinada referência de posição. Entretanto, o deslocamento efetivo do arame sofre uma pequena alteração devido à presença da estratégia de inversão de movimento inserida no processo.

Tal estratégia adiciona pulsos no sinal de *step* que são adicionados à referência de deslocamento ajustada pelo usuário através do parâmetro “cArc”. Contudo, a diferença entre o deslocamento efetivo para a referência se encontra dentro de limites toleráveis e não causa danos e/ou irregularidades no procedimento uma vez que o deslocamento efetivo é relativamente constante ao longo de todo procedimento. Visando levantar conclusões mais assertivas acerca do controle de deslocamento, registra-se a necessidade da realização do procedimento da etapa B sem a estratégia de inversão.

O método de medição utilizado não permite estabelecer uma rígida análise quantitativa do deslocamento. Alguns pontos devem ser considerados em uma análise mais criteriosa, tais como a oscilação da poça de fusão, a ancoragem do arco, fusão de uma parcela do arame, e outros erros intrínsecos à câmara e ao método de medição. Dessa forma, neste estudo considerou-se os resultados como uma referência acerca da ordem de grandeza do deslocamento do arame.

5.2.3 Etapa C - Estratégia de Inversão

O estudo da dinâmica de retorno de arame é necessário para concluir acerca da estratégia proposta para acelerar a inversão do movimento e, assim, permitir que o sistema atue em uma maior faixa de frequências de transferência. Para isso é necessário o levantamento de informações sobre o que é chamado, neste trabalho, de tempo morto de recuo ou atraso inercial.

Conforme o gráfico da Figura 5.15, o recebimento do sinal de inversão, visando o recuo do arame, ocorre no momento em que é detectado o curto-circuito. Neste instante, o arame está sendo movimentado no sentido de avanço. Assim, antes de haver um deslocamento efetivo no sentido de recuo, o arame realiza a desaceleração do movimento até sua parada. Após este instante o arame dá início ao movimento de recuo propriamente dito, acelerando até a velocidade programada na IHM pelo usuário. Define-se, então, o tempo morto de recuo como o intervalo entre o recebimento do sinal de inversão e o início do movimento de retorno propriamente dito.

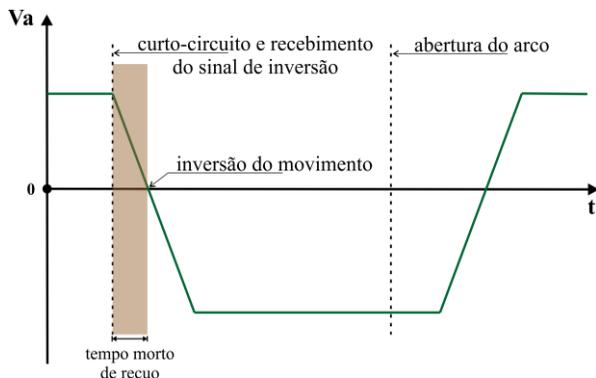


Figura 5.15 - Trajetória executada pelo arame durante a etapa de curto-circuito.

A estratégia desenvolvida está relacionada com o envio de uma pequena quantidade de pulsos (sinal *step*) em alta frequência no sentido de retorno do arame, gerando um sobressinal de velocidade. Uma alta frequência de pulsos é interpretada pelo driver como uma alta velocidade de rotação. Assim, ao receber tais pulsos, o sistema de controle do servoacionamento gera um sinal de controle elevado a fim de atingir tal velocidade de referência. O foco dessa estratégia é auxiliar a vencer a inércia do rotor do servomotor, de modo que a inversão de movimento se dê em um menor intervalo de tempo.

Dessa forma, os ensaios estabelecidos como Etapa C têm como objetivo avaliar a estratégia implementada para diminuir o que se define, neste trabalho, como tempo morto de recuo ou atraso inercial.

5.2.3.1 Metodologia

De forma semelhante às etapas anteriores, os ensaios desta etapa consistiram de depósitos sobre chapa de aço carbono SAE 1020 de 3,0 mm de espessura. O metal de adição foi o arame ER70S-6 de 1,2 mm de diâmetro. A proteção gasosa foi composta de uma mistura de 25% de CO_2 e 75% de argônio a uma vazão ajustada em 15 l/min.

Inicialmente, foram realizados dois ensaios, tendo como parâmetros de entrada valores idênticos. A única diferenciação entre eles é a presença (Ensaio C1) e a ausência (Ensaio C2) da estratégia de inserção de um sobressinal de referência para velocidade no momento de detecção do curto-circuito. O sobressinal é definido como o equivalente ao deslocamento de 1,0 mm a uma velocidade de 80 m/min. Os

parâmetros principais utilizados nestes ensaios podem ser analisados na Tabela 5.8.

Tabela 5.8 - Principais parâmetros para o ensaio de avaliação da inversão do movimento (Etapa C).

	Ensaio C1	Ensaio C2
Vap, Vab [m/min]	35,0	35,0
Vr [m/min]	45,0	45,0
Ipa [A]	250	250
Iba [A]	75	75
Ic [A]	50	50
tpa [ms]	2,5	2,5
cArc [mm]	2,0	2,0
Sobressinal	Sim	Não

Foram levantados dados para o estabelecimento de critérios de avaliação dos efeitos da estratégia. As informações referentes a esta etapa foram reunidas a partir da medição da duração média da fase de curto-circuito de cada ensaio, assim como a média do tempo referente ao atraso inercial do sistema. Estas medições foram realizadas com o auxílio do software Motion Studio, conforme ilustrado na Figura 5.16. Por meio desse software é possível analisar e medir os diferentes sinais adquiridos de forma sincronizada com os *frames* da filmagem. Adicionalmente, foi realizada a aquisição de dados referentes à corrente que circula no motor presente na tocha através do software de configuração e monitoração do servoacionamento (WorkBench) fornecido pelo fabricante Kollmorgen.

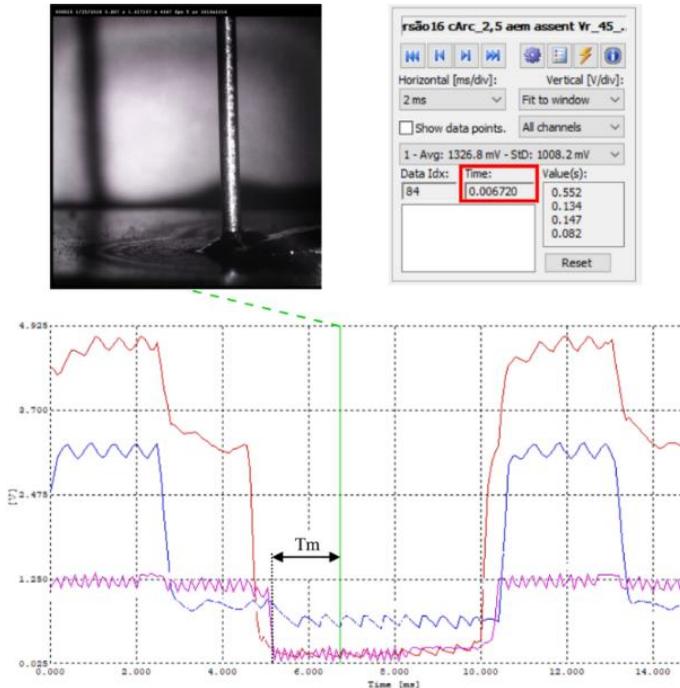


Figura 5.16 – Metodologia de medição utilizando software Motion Studio. No exemplo é destacado o tempo morto (T_m) de recuo.

5.2.3.2 Resultados e Discussões

A eficácia dessa estratégia pôde ser verificada nos ensaios propostos. Os oscilogramas de tensão e corrente do Ensaio C1, com a utilização dessa estratégia, e Ensaio C2, sem a estratégia implementada, são apresentados na Figura 5.17.

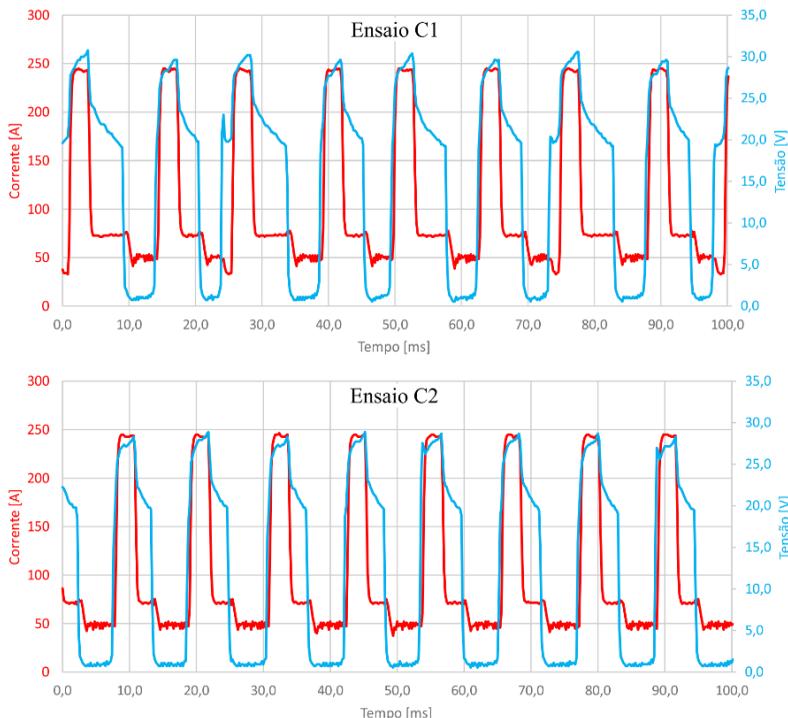


Figura 5.17 - Oscilogramas de corrente e tensão para o Ensaio C1 (acima) e Ensaio C2 (abaixo).

De uma perspectiva mais generalizada, através da análise dos oscilogramas apresentados, pode-se dizer que a estratégia não surte um efeito pronunciado no período de transferência. Ambos ensaios apresentam resultados semelhantes, entretanto é possível notar que há uma diminuição do tempo de curto-circuito em alguns períodos do Ensaio 1, quando comparado ao Ensaio 2.

Intencionando avaliar de forma mais direta a atuação da estratégia implementada, foi necessário realizar medições mais focadas à etapa de curto-circuito, uma vez que a redução desta é o alvo da técnica desenvolvida. Para isso foram realizadas filmagens de alta velocidade, juntamente com a aquisição de dados dos sinais de controle do servomotor, e posterior análise do resultado.

Os intervalos de tempo referentes ao atraso inercial foram levantados com o auxílio do software Motion Studio a partir das imagens obtidas na filmagem de alta velocidade. Na Tabela 5.9 foram retirados os

instantes de tempo referentes ao envio do sinal para inversão e início do movimento para um conjunto de amostras. Os vídeos dos ensaios estão disponíveis para acesso através dos *QR codes* na tabela.

Tabela 5.9 - Cálculo do atraso inercial a partir das imagens de alta velocidade.

	t movimento			Vídeo
	t sinal (s)	(s)	Δt (ms)	
Ensaio C1	0,007200	0,008160	0,96	
	0,017432	0,018480	1,05	
	0,028545	0,029520	0,98	
	0,039205	0,040080	0,88	
	0,050160	0,051120	0,96	
	0,060773	0,061680	0,91	
	0,071364	0,072480	1,12	
Ensaio C2	0,015705	0,01704	1,34	
	0,026955	0,02832	1,37	
	0,037750	0,03912	1,37	
	0,048720	0,04992	1,20	
	0,059682	0,06096	1,28	
	0,070636	0,07200	1,36	
	0,081600	0,08280	1,20	

A duração das etapas de curto-circuito dos ensaios também foi levantada. O resultado é exposto na forma de histogramas, na Figura 5.18.

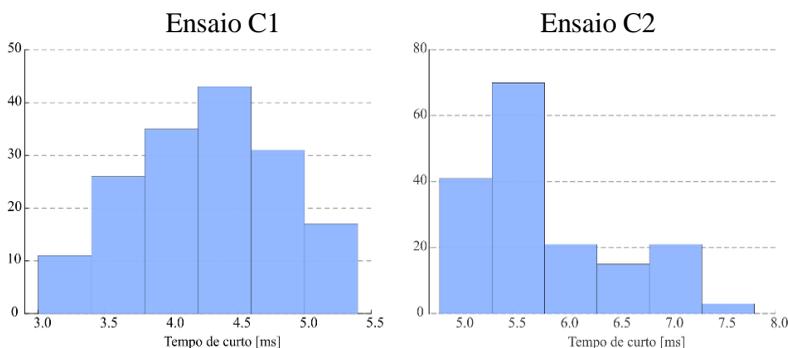


Figura 5.18 - Histogramas dos tempos de curto-circuito para o Ensaio C1 (esq.) e para o Ensaio C2 (dir.).

O valor médio do atraso inercial, bem como a média ponderada do intervalo de duração da etapa de curto-circuito são reunidos na Tabela 5.10.

Tabela 5.10 - Atraso inercial e duração média da etapa de curto-circuito para os ensaios da Etapa C.

	Ensaio C1	Ensaio C2	
Atraso inercial	0,98 ms	1,30 ms	↓25%
Tempo médio de curto	4,23 ms	5,78 ms	↓27%

Os resultados observados na Tabela 5.10 indicam uma redução significativa dos tempos de curto-circuito, cerca de 27%, assim como uma diminuição do atraso inercial em, aproximadamente, 25%. Os valores relativos foram calculados com base nos dados do Ensaio C2, no qual não existe estratégia de acelerar o recuo do arame. Destaca-se, ainda, uma distribuição mais uniforme em torno da média dos tempos de curto-circuito, conforme apresentado nos histogramas da Figura 5.18. Esta uniformidade contribui para a repetibilidade do depósito e torna o sistema mais confiável e previsível.

Visando certificar o efeito da inclusão do sobressinal no momento da inversão de movimento no servomotor foi realizada uma aquisição de dados da corrente que circula internamente no motor e de velocidade de arame. O resultado dessa aquisição é apresentado na Figura 5.19.

Comparando-se os resultados da aquisição na Figura 5.19 observa-se algumas diferenças importantes. A primeira delas é em relação ao pico de corrente que circula no motor no momento da inversão para o sentido de recuo. No Ensaio C1 a corrente atinge valores próximos de -4 A, enquanto que no Ensaio C2 os picos ficam próximos de -2 A.

Outra diferença é constatada no perfil da curva de velocidade. O pico de corrente é resultado do sobressinal enviado no instante da detecção do curto-circuito. O sistema de controle do servoacionamento eleva a corrente do motor a fim de atingir a referência de velocidade enviada pelo sobressinal. Como esse sinal é passado por um período de tempo muito curto, o sistema não consegue atingir tal velocidade nesse intervalo. Em contrapartida, a alta aceleração do motor, provocada pela alta corrente circulando, é aproveitada para executar o movimento seguinte que, neste caso, é o retorno na velocidade determinada na IHM. Dessa forma, o tempo morto de recuo é reduzido, conforme os resultados evidenciam.

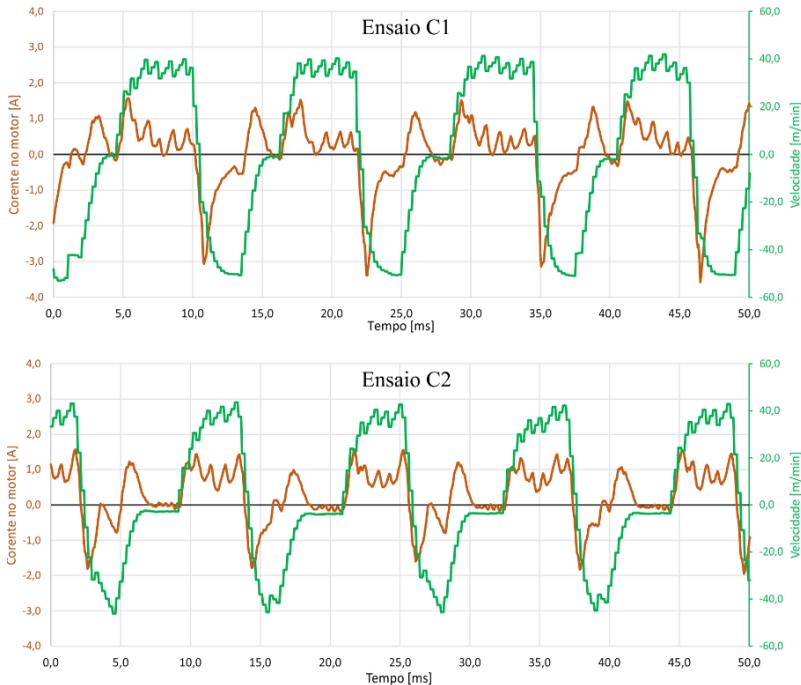


Figura 5.19 - Corrente e Velocidade do servomotor para o Ensaio C1 (acima) e para o Ensaio C2 (abaixo).

Quando a estratégia é utilizada, o servomotor atinge velocidades ligeiramente maiores no recuo quando comparado ao ensaio que não usa a estratégia. Isto é explicado pela maior parcela de corrente que auxilia o motor a atingir a velocidade de regime permanente em um menor tempo. No gráfico do Ensaio C2 a velocidade não chega a atingir a velocidade de regime quando o sistema inicia a desaceleração, ao contrário do que ocorre no Ensaio C1. Aponta-se, ainda, para o fato de o pico de corrente ficar abaixo do valor máximo especificado no *datasheet* do servomotor de 4,65 A [48].

5.2.3.3 Conclusões da Etapa C

O método de acelerar a retração de arame desenvolvido se provou eficaz, reduzindo o atraso inercial em torno de 25%. A monitoração da corrente que alimenta o servomotor permitiu concluir que o limite aceitável pelo sistema é obedecido. Assim, a estratégia foi implementada

de forma permanente no processo, fazendo parte de todos os ensaios e aplicações deste trabalho.

5.2.4 Etapa D - Estratégia de Mergulho de Arame

Como alternativa para ampliar a faixa de aplicações e possibilitar a atuação em momentos específicos do período de transferência foi incorporado no sistema de controle uma estratégia que permite ajustar o momento em que o arame é recuado após o curto-circuito. Esse ajuste permite que o arame mergulhe na poça de fusão visando o controle térmico e geométrico tanto da poça de fusão como do cordão de solda (maiores mergulhos resultam em mais transferência de calor da poça ao arame) e redução do aporte térmico, por exemplo.

A implementação da estratégia de imersão de arame na poça de fusão agregou dois parâmetros adicionais ao sistema. O primeiro deles, denominado mergulho, corresponde a um retardo, em milissegundos, na identificação do curto-circuito pelo software de controle. Isso faz com que, mesmo após o contato entre eletrodo e a poça de fusão, o arame continue o movimento em direção à poça de fusão e “mergulhe” na mesma. O segundo parâmetro, denominado “atraso”, é responsável por retardar o comando de recuo, após o fim do mergulho, pelo tempo ajustado no parâmetro (em milissegundos). Assim, o arame permanece imóvel dentro da poça de fusão durante esse intervalo.

Outra alteração realizada no sistema foi a modificação da referência de deslocamento para o recuo do arame. Anteriormente o sistema de controle utilizava o valor referente ao parâmetro “cArc” como a distância a ser recuada a partir do instante de curto-circuito. Após a alteração, o sistema de controle utiliza este mesmo parâmetro para a distância a ser recuada a partir do instante de rompimento da ponte metálica, ou seja, a reabertura do arco. Esta alteração foi necessária de forma a compensar a porção de arame que desloca para imergir na poça de fusão.

Os estudos aqui definidos como Etapa D têm como objetivo avaliar o funcionamento e as implicações da estratégia de mergulho no período de transferência do sistema MIG/MAG AD.

5.2.4.1 Metodologia

Os ensaios desta etapa consistiram em depósitos sobre chapas de alumínio de 3,0 mm de espessura, 50 mm de largura e 176 mm de comprimento. Como metal de adição foi utilizado o arame ER4043 de 1,2

mm de diâmetro. Como proteção gasosa foi utilizado gás argônio comercialmente puro, a uma vazão de 17 l/min.

Para a monitoração do procedimento, foram realizadas filmagens utilizando o sistema de alta velocidade. As variáveis elétricas do arco e a velocidade de consumo de arame foram registradas com o SAP.

Este estudo foi dividido em duas partes. A parte inicial, parte I, consiste em uma análise fenomenológica da transferência metálica com a introdução da estratégia de mergulho e suas implicações. Os parâmetros utilizados são expostos na Tabela 5.11. Com o parâmetro de atraso fixo em zero, variou-se o parâmetro “mergulho” de 0,0 a 4,0 ms. Posteriormente, na parte II, o parâmetro “atraso” é investigado.

Tabela 5.11 - Ensaios para a Etapa D – Parte I, visando avaliar o fenômeno de mergulho do arame na poça de fusão.

	Mergulho [ms]	Atraso [ms]
Ensaio D1	0,0	0,0
Ensaio D2	2,0	0,0
Ensaio D3	4,0	0,0

Os demais parâmetros do procedimento são listados na Tabela 5.12 e permaneceram inalterados para todos ensaios desta etapa.

Tabela 5.12 - Parâmetros comuns a todos ensaios da Etapa D.

Parâmetro	Valor
Vap e Vab	50,0 m/min
Vr	30,0 m/min
Ipa	160 A
Iba	75 A
Ic	50 A
tpa	3,5 ms
CArc	0,2 mm
Vs	15 cm/min

A parte II pretende concluir acerca das influências do parâmetro “atraso” na transferência metálica. Nestes experimentos, aumentou-se gradativamente este parâmetro enquanto que o “mergulho” permaneceu em 2,0 ms em todos experimentos. A relação destes ensaios é apresentada na Tabela 5.13. O restante de parâmetros foi mantido conforme a Tabela 5.12.

Tabela 5.13 - Ensaio para a Etapa D – Parte II, visando avaliar o fenômeno de mergulho com atraso do arame na poça de fusão.

	Mergulho [ms]	Atraso [ms]
Ensaio D2	2,0	0,0
Ensaio D4	2,0	2,0
Ensaio D5	2,0	4,0
Ensaio D6	2,0	6,0

5.2.4.2 Resultados e Discussões

Os oscilogramas de corrente, tensão e velocidade de arame consumido referente à parte I são apresentados na Figura 5.21. As informações referentes aos valores médios de variáveis do processo são exibidas na Tabela 5.14. O acesso aos vídeos dessa etapa é disponibilizado através do link contido no *QR code* da Figura 5.20.



Figura 5.20 - *QR code* para acesso aos vídeos da Etapa D.

Tabela 5.14 – Valores médios para variáveis do processo, resultado dos ensaios da Etapa D – Parte I.

	Ensaio D1	Ensaio D2	Ensaio D3
Mergulho [ms]	0,7	2,7	4,7
Corrente [A]	82	73	71
Tensão [V]	14,1	10,3	8,9
Potência [W]	1378	967	837
Vel. Arame [m/min]	5,5	4,1	3,6

Nas imagens da Figura 5.21 são destacados, em linhas pontilhadas, os intervalos em que o arame se encontra em processo de mergulho, bem como o valor médio dos mesmos. Este intervalo é iniciado pelo contato entre a gota formada na ponta do arame com a poça de fusão (curto-circuito), momento em que a tensão vai a zero. O fim do avanço do arame é marcado pela queda da corrente até o patamar de corrente de curto-circuito (Ibc), que marca a mudança de etapa, conforme reportado na Figura 4.22.

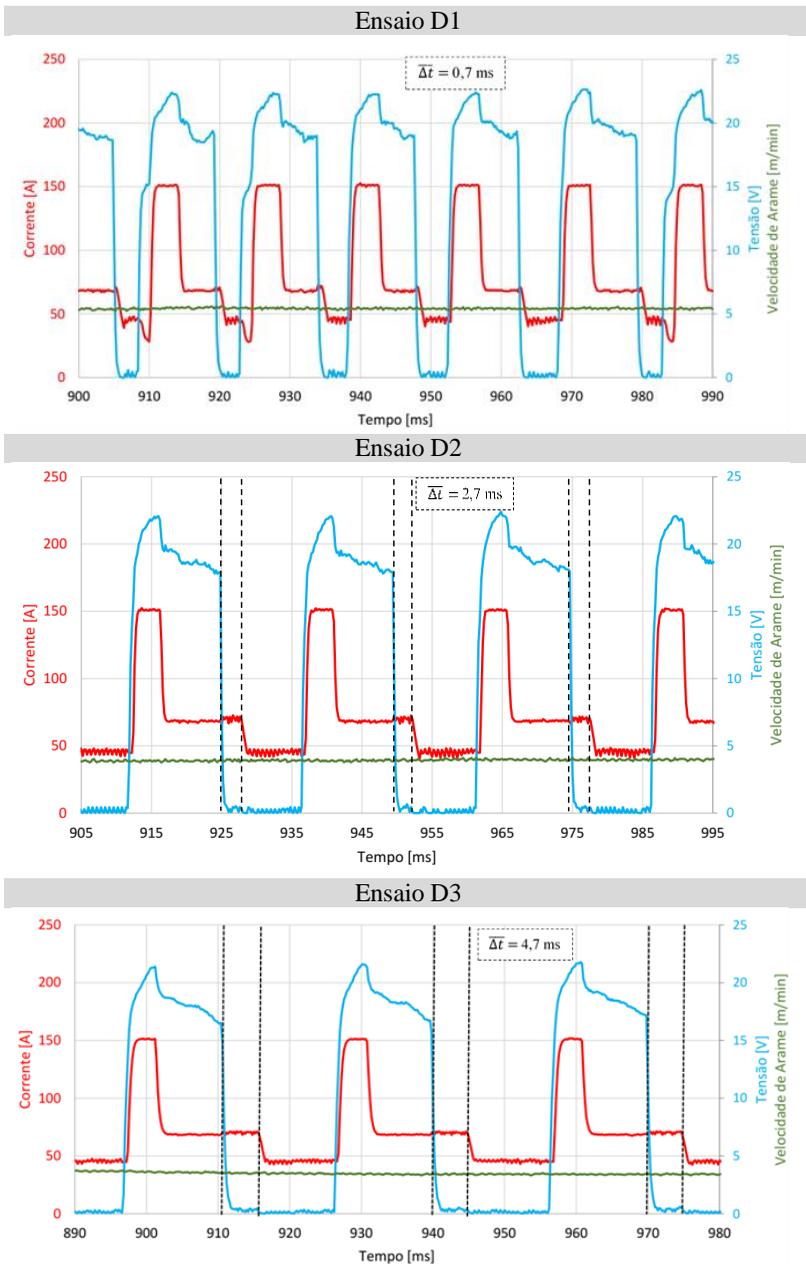


Figura 5.21 – Oscilogramas de tensão, corrente e velocidade de arame referentes aos ensaios D1, D2 e D3.

A janela temporal mostrada nos gráficos é a mesma, 90 ms, de forma que fica evidente o aumento no intervalo que o arame realiza a imersão. Além disso, é interessante notar que o sistema respeita o tempo pré-ajustado com um adicional constante de 0,7 ms. Este adicional faz parte da lógica implementada no sistema de forma a aumentar a estabilidade nas transições entre estados de curto e arco. De forma geral, fica demonstrado que o tempo ajustado para o mergulho do arame foi respeitado em todos os ensaios.

O elevado tempo de mergulho configurado para o ensaio D3 gerou algumas irregularidades na transferência metálica. Em alguns momentos foram evidenciados problemas relacionados com o *sticking* e aderência do arame ao metal de base, ativando proteções do sistema de controle, conforme apontado na Figura 5.22. Essa problemática também pode ser observada nos quadros destacados na Figura 5.23, referentes a um ensaio estável de baixa energia, similar ao Ensaio D4. Neste ensaio, a geometria de formação do cordão é típica de um procedimento com baixa energia para determinada velocidade de soldagem. Em situações de pouca energia o material depositado tem uma tendência de formar um cordão convexo devido aos efeitos da tensão superficial. Assim, o arame entra em contato com uma porção muito pequena de metal fundido, o que torna a estratégia de mergulho infrutífera, uma vez que não há mergulho, e gera instabilidades devido ao contato entre arame e chapa sólida (*sticking*). Como comparação, é exibida na Figura 5.24 a situação oposta, de alta energia, onde a poça de fusão é maior, mais fluida e o arame entraria em contato com o material fundido, caso o parâmetro de mergulho estivesse devidamente configurado.

Outro resultado já esperado e evidenciado na comparação dos oscilogramas, e analisando a Tabela 5.14, é o significativo decréscimo da velocidade de arame consumido conforme aumenta-se o mergulho. Isso se dá devido ao aumento do período de curto-circuito, ocasionado pelo tempo em que o arame se desloca para dentro da poça de fusão. O aumento do período de curto aumenta o período de transferência e diminui a velocidade de alimentação, conforme a Equação 2.3.

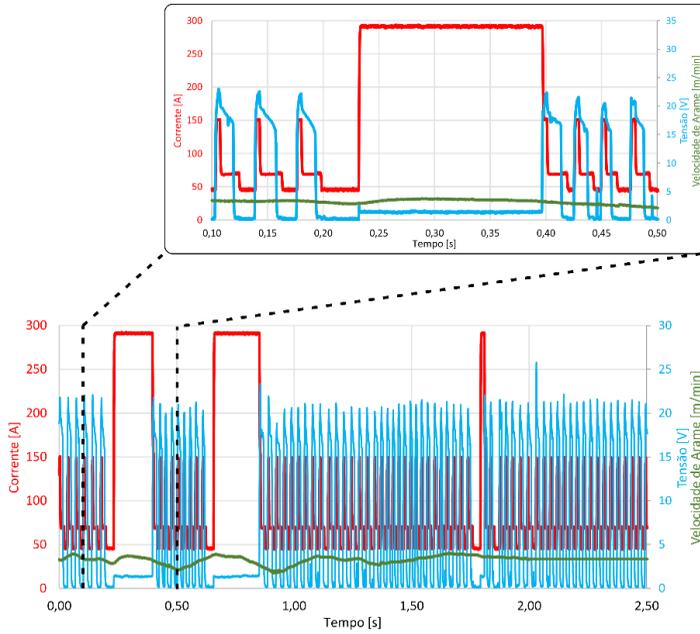


Figura 5.22 - Irregularidades na etapa de curto-circuito e ativação de proteções do sistema de controle, indicativo de *sticking*.

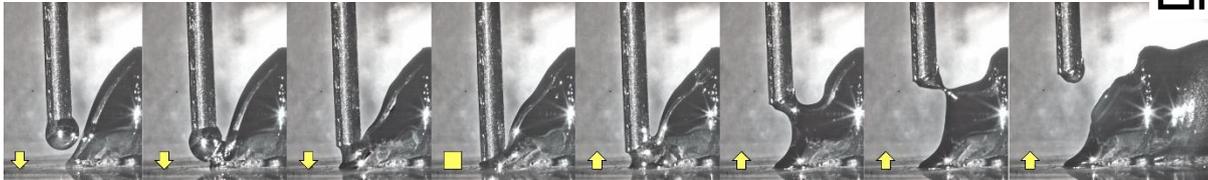


Figura 5.23 - Sequência de quadros ilustrando o período de curto-circuito referente a um depósito de baixa energia.
As setas indicam o sentido de movimento de arame.

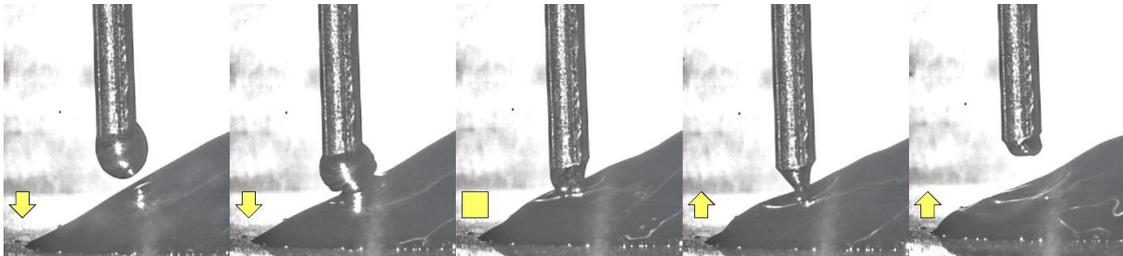


Figura 5.24 – Sequência de quadros ilustrando o período de curto-circuito referente ao ensaio D1, alta energia.
As setas indicam o sentido de movimento de arame.

Nas Figura 5.25 são exibidos os histogramas referentes aos períodos de curto-circuito para os ensaios D1, D2 e D3, bem como o valor médio e o desvio padrão (σ) da amostra em termos relativos. Nota-se que há um aumento expressivo do período de curto-circuito conforme aumenta-se o parâmetro de mergulho. Outro efeito a ressaltar é a distribuição quando se utiliza o parâmetro de mergulho ajustado em 2,0 ms (Ensaio D2). Nesta condição há uma menor variação entre os intervalos de curto quando comparado a outras condições, evidenciado pelo menor desvio padrão. Este resultado é indicativo de uma transferência metálica mais repetitiva, uniforme e estável. Dessa forma, pode-se pressupor que a utilização deste parâmetro, apropriadamente ajustado, pode auxiliar a contornar algumas instabilidades na transferência metálica.

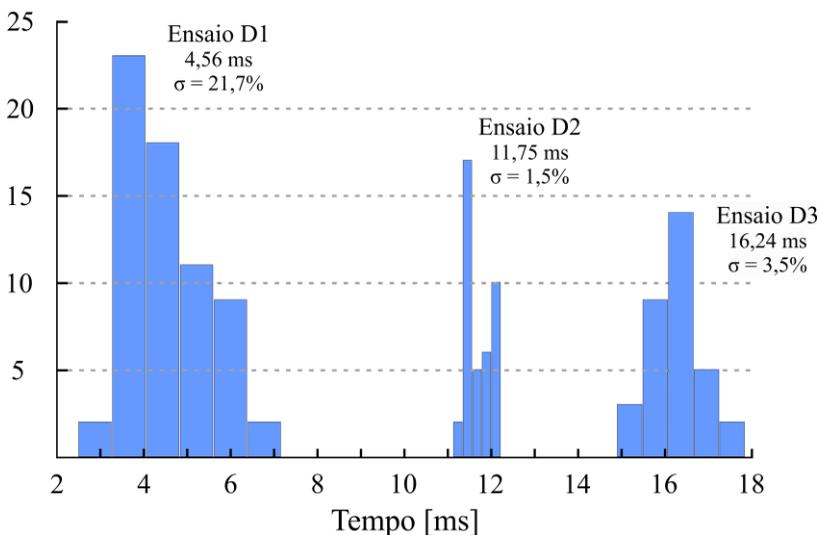
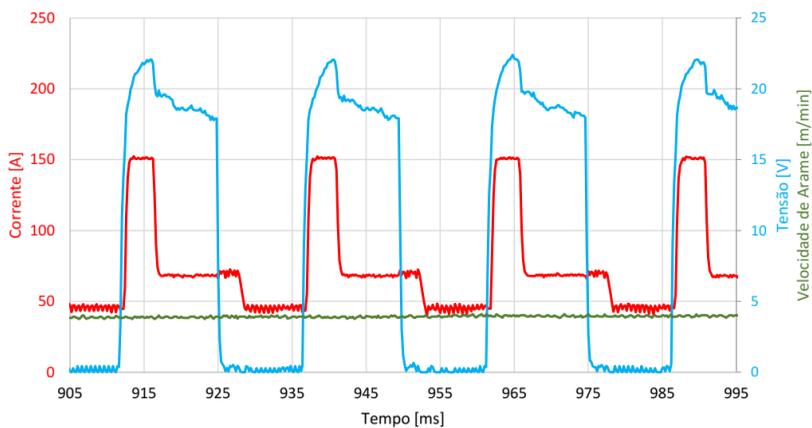


Figura 5.25 - Histogramas do tempo de curto referentes aos ensaios da etapa D parte I

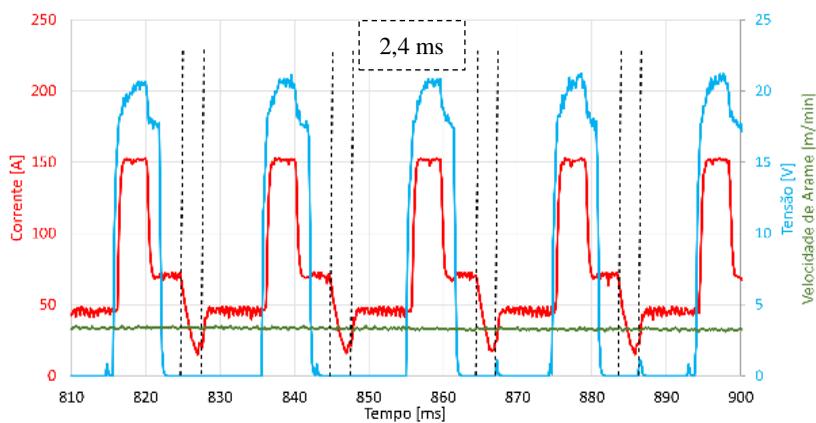
O segundo grupo de ensaios, parte II, visa avaliar os efeitos do parâmetro de atraso no comportamento da transferência metálica, enquanto o parâmetro de mergulho permanece fixo em 2,0 ms.

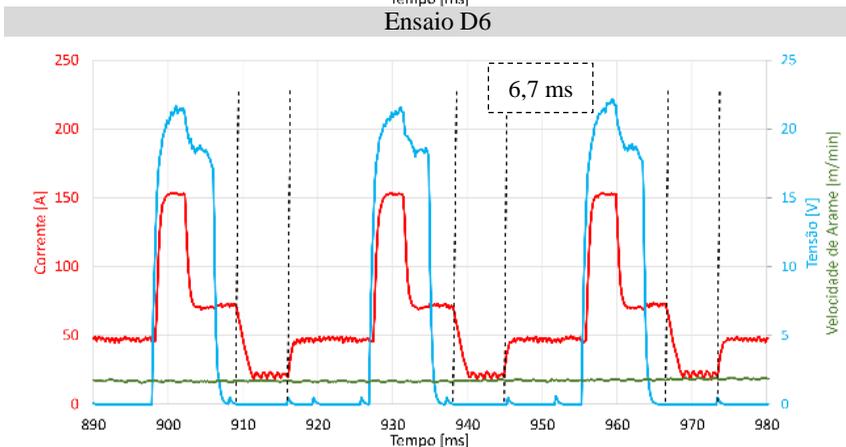
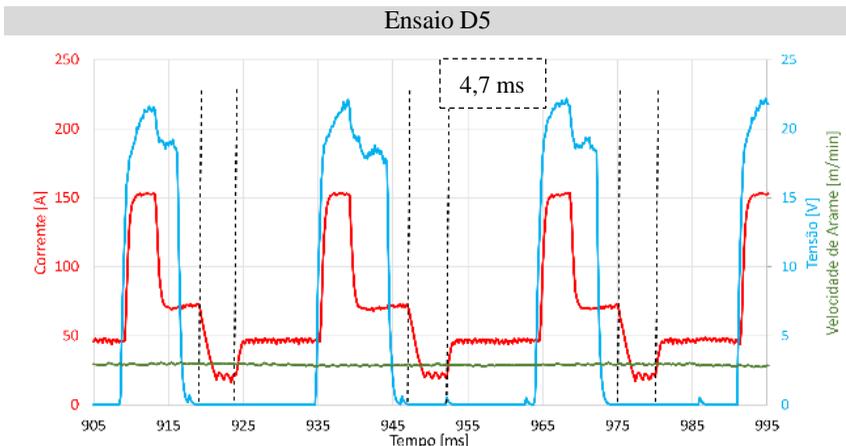
Os oscilogramas de tensão, corrente e velocidade de arame para os ensaios D2, D4, D5 e D6 são exibidos na Tabela 5.15. Nas imagens, são destacados os intervalos nos quais o arame permanece imóvel.

Tabela 5.15 – Oscilogramas de tensão, corrente e velocidade de arame referentes aos ensaios da Etapa D – Parte II
Ensaio D2



Ensaio D4





O ensaio D2 não apresenta atraso, ao fim do mergulho a corrente passa para o patamar definido como I_c , conforme se observa no primeiro oscilograma da Tabela 5.15. Já nos demais experimentos, o atraso é aumentado gradativamente, em 2,0 ms, de um ensaio para outro. Nestes, a corrente cai para a metade do valor definido em I_c e, após o atraso, volta ao nível original de intensidade definido para a etapa de curto-circuito. Esse comportamento evidencia, nas aquisições, o intervalo de atraso.

A Tabela 5.16 reúne os valores médios para as variáveis do processo de cada ensaio da etapa.

Tabela 5.16 – Valores médios para variáveis do processo, resultado dos ensaios da Etapa B – Parte II.

Ensaio	D2	D4	D5	D6
Atraso [ms]	0,0	2,0	4,0	6,0
Corrente [A]	73	70	65	62
Tensão [V]	10,3	6,2	6,0	5,4
Potência [W]	967	743	670	604
V. Arame [m/min]	4,1	3,1	2,5	2,0

Similarmente aos resultados iniciais, se observa que o período de transferência sofre bastante alteração entre ensaios. Os valores de potência, bem como a velocidade de consumo de arame decaem conforme se aumenta o tempo de atraso. Nota-se também um decréscimo no valor médio de tensão, o que é coerente com os eventos físicos em curso, uma vez que, com o aumento do atraso, aumenta-se o tempo em que o arame permanece em contato com a poça de fusão, tensão próxima de zero. Ao aumentar esse tempo aumenta-se igualmente a ponderação dessa etapa na média do processo.

O comportamento da transferência metálica dos ensaios foi acompanhado por meio da filmagem de alta velocidade. Os quadros da Figura 5.26 ilustram a sequência de eventos registrada para o ensaio D5 sincronizados com os sinais de controle e variáveis elétricas do arco. Nas imagens, as setas indicam o sentido de movimentação do arame.

O *frame* identificado como 1 marca os instantes finais do pulso de corrente. A gota se encontra em formação na extremidade do arame e o mesmo se movimenta em direção à poça de fusão. O *frame* 2 mostra o início da etapa de curto-circuito e a gota começa a se assentar na poça de fusão devido a ação da força de tensão superficial. Apesar da ocorrência do curto circuito, o arame continua avançando em virtude do parâmetro “mergulho” configurado em 2,0 ms. Após um período de aproximadamente 2,6 ms, no *frame* 3, o sistema de controle muda para etapa de curto, na qual a corrente é reduzida e o sinal do sinal *dir* muda de estado. O arame continua o movimento de avanço, por efeito da inércia, desacelerando até sua parada, demarcada no *frame* 4. O quadro 6 marca o início do movimento de recuo do arame. Após o rompimento da ponte metálica, mostrada no quadro 7, o arame continua recuando até atingir a altura configurada pelo parâmetro “cArc”.

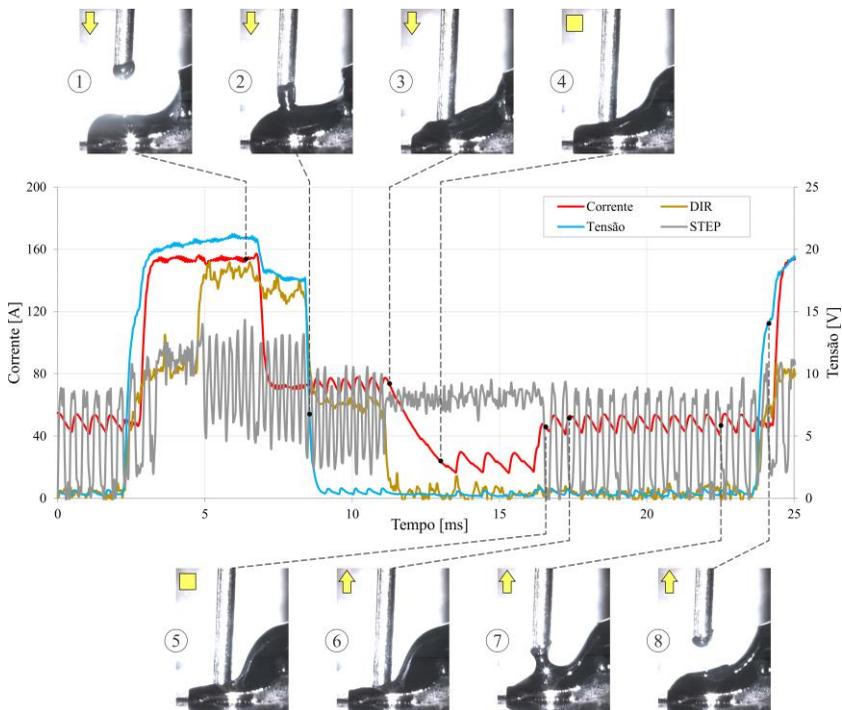


Figura 5.26 - Detalhamento do período de transferência relativo ao Ensaio D5.

Os intervalos relevantes para esta etapa de avaliação foram medidos através do software Motion Studio. O intervalo entre os quadros identificados como 4 e 6, correspondente ao tempo em que o arame fica imóvel, foi mensurado em 4,0 ms. O intervalo entre os quadros 3 e 5 corresponde ao intervalo em que o sistema para de enviar pulsos, mensurado em, aproximadamente, 5,4 ms.

Estes resultados evidenciam o funcionamento apropriado da implementação da estratégia de mergulho no sistema do MIG/MAG AD. Na Figura 5.26 pode-se observar o intervalo em que o sistema cessa o envio do sinal de *step* entre os *frames* 3 e 5. Isso significa que, naquele intervalo, não deve haver movimento programado. Outra evidência favorável ao funcionamento da estratégia é o intervalo entre o curto-circuito propriamente dito e a identificação atrasada, propositalmente, do mesmo. Este comportamento é a base de funcionamento da estratégia de mergulho.

5.2.4.3 Conclusões da Etapa D

O parâmetro de mergulho provoca uma alteração na duração do período de transferência e, conseqüentemente, altera a velocidade de arame média do processo. Entretanto, quando bem ajustado, o uso da estratégia pode auxiliar a transferência metálica tornando-a mais uniforme e contribuindo com a estabilidade geral do processo. Em contrapartida, um ajuste excessivo deste parâmetro pode provocar instabilidades no sistema relacionados ao *stutting*. De forma semelhante, o parâmetro de atraso influi no período de curto circuito diretamente, tornando-o mais longo, conseqüentemente diminuindo o consumo médio de arame.

O recurso de filmagem de alta velocidade, juntamente com a aquisição dos sinais de controle do acionamento e variáveis elétricas do arco, permite elucidar o funcionamento da estratégia de mergulho implementada. Foi verificado que o arame permanece, de fato, imóvel durante o intervalo ajustado no parâmetro “atraso” e realiza a imersão na poça de fusão conforme configurado no parâmetro “mergulho”.

6 APLICAÇÕES DO PROTÓTIPO

6.1 REVESTIMENTO METÁLICO VERTICAL UTILIZANDO O PROCESSO AD-P

As operações de revestimento metálico são comumente empregadas em função de condições favoráveis à ocorrência de corrosão as quais componentes e estruturas estão submetidos. Em determinadas situações, a necessidade de revestir não está somente relacionada com o alto custo de se produzir uma peça inteira de material resistente à corrosão, há também uma necessidade de se garantir propriedades mecânicas que não poderiam ser atingidas pelas CRA's (*Corrosion Resistant Alloys*). Uma grande variedade de ligas metálicas pode ser utilizada como CRA, dentre as mais importantes pode-se destacar os aços inoxidáveis e ligas a base de níquel [49]. Em um contexto voltado à manufatura de componentes revestidos, os processos de fabricação por soldagem têm significativa participação.

De maneira geral, as especificações para operações de revestimento metálico estão relacionadas com a espessura da camada depositada e o nível de diluição com o metal de base que, em essência, deve ter valores baixos. Além disso, características de cunho operacional também são avaliadas, como a capacidade de automação do processo, a taxa de deposição fornecida e a qualidade do depósito. A análise sobre todos esses aspectos influencia na tomada de decisão sobre qual o processo utilizar em determinada situação.

O processo de soldagem MIG/MAG, com suas diversas versões, tem um vasto campo de aplicação para essa finalidade. Se tratando de aplicações de revestimento metálico, são encontrados trabalhos que argumentam em favor do processo pulsado [14] [50], assim como são encontrados trabalhos sustentando o uso de modalidades que fornecem um menor aporte térmico, como o CMT [32] [50] [51]. Tendo em vista a união das vantagens de ambos processos, o presente trabalho emprega o sistema MIG/MAG AD desenvolvido, agregando ciclos com maior nível de potência fornecida pela pulsação da corrente, configurando uma versão mista, aqui denominada de MIG/MAG AD-P. A quantidade de ciclos a executar em cada modo é configurável e os efeitos da relação entre o número de períodos de transferência em cada processo também é objeto de estudo neste trabalho.

A alternância entre modos de transferência é controlada pelo software embarcado no microcontrolador da fonte de soldagem e foi modificado de forma que pudesse atender às necessidades do estudo

proposto. A principal modificação necessária foi a criação de etapas de transição entre os processos. A função destas etapas é de fornecer condições para o processo operar conforme o regime permanente do modo de transferência de destino. Assim, duas fases distintas foram adicionadas: transição do curto para o pulsado ($T_{\rightarrow pulsado}$) e transição do pulsado para o curto-circuito AD ($T_{\rightarrow AD}$). Na Figura 6.1 tem-se a divisão de um ciclo de soldagem composto de 4 períodos de transferência, dois no processo pulsado e dois em curto-circuito. Em destaque, estão as etapas de transição. Em amarelo tem-se a transição do processo pulsado para o curto-circuito AD ($T_{\rightarrow AD}$) e em verde a transição deste para o pulsado ($T_{\rightarrow pulsado}$).

A transição $T_{\rightarrow pulsado}$ fornece a corrente média do processo pulsado por um intervalo equivalente ao período do mesmo. Essa estratégia visa garantir que o arco forneça a energia necessária para o destacamento de gotas, já no primeiro pulso. Concomitantemente, o arame é recuado por uma distância adicional predeterminada. Já a transição $T_{\rightarrow AD}$ mantém o valor da corrente de base do pulsado e a gota cresce por inércia térmica, conforme reportado por Pang et al. [34]. Nesta etapa, o arame é acelerado para que haja o curto-circuito. A partir deste momento o sistema segue a máquina de estados do processo MIG/MAG AD, ilustrada na Figura 4.22.

Como resultado prático de soldagem em uma aplicação do equipamento MIG/MAG-AD desenvolvido foram realizados procedimentos que visam o revestimento na posição vertical descendente, utilizando como material de adição o arame da liga de níquel 625 sobre uma superfície de aço carbono. Objetiva-se concluir acerca das influências da técnica de alimentação dinâmica de arame no resultado do revestimento, bem como da alternância entre os modos pulsado e curto circuito de transferência metálica do processo MIG/MAG.

6.1.1 Metodologia

Os ensaios foram realizados visando simular uma aplicação de revestimento em posição vertical, sentido descendente. Os corpos de prova foram preparados em dimensões de 200 mm de comprimento e 100 mm de largura a partir de uma chapa de aço carbono 1020 de 12,7 mm (1/2") de espessura. Como arame de adição utilizou-se a liga de níquel 625, diâmetro de 1,2 mm. A proteção gasosa foi feita com uma mistura binária de argônio (75%) e hélio (25%).

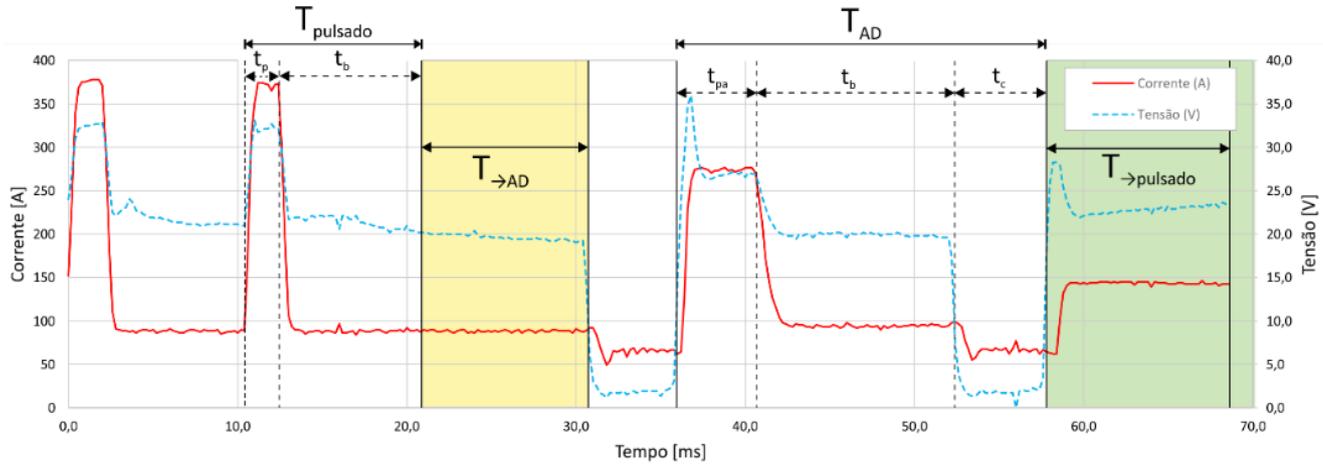


Figura 6.1- Divisão do ciclo de soldagem, composto de 4 períodos, do processo AD-P na proporção 50%. Estão em destaque as etapas de transição.

A fim de se obter uma comparação direta do resultado de cada ensaio, optou-se por padronizar os parâmetros de velocidade de arame e de movimento do manipulador da tocha de soldagem em todos os experimentos. Através de ensaios prévios, a velocidade de soldagem foi definida devido às limitações do processo pulsado, que apresenta uma maior tendência para o escorrimento da poça em posição vertical, exigindo valores mais elevados de velocidade de soldagem. Assim estabeleceu-se a velocidade de 60 cm/min (10 mm/s) para todos ensaios. As especificações do procedimento comuns a todos os ensaios podem ser observadas na Tabela 6.1 e o esquemático na Figura 6.2.

Tabela 6.1 – Especificações comuns a todos os ensaios.

Material de adição	Inconel 625; Ø1,2 mm
Material de base	Aço carbono SAE 1020
Gás de proteção	75% Ar + 25% He
Vazão de gás	17 l/min
Posição de soldagem	Vertical descendente
Ângulo de ataque	20° puxando
DBCP	17 mm
Velocidade de soldagem	10 mm/s

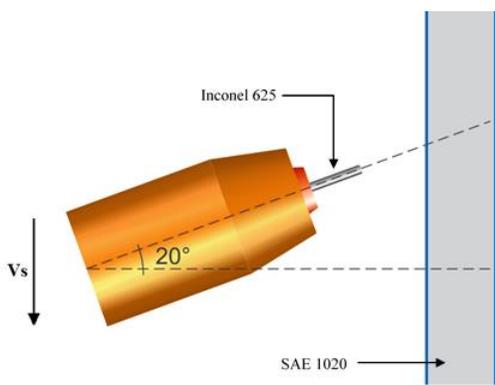


Figura 6.2 - Esquemático do procedimento.

Ambos processos foram parametrizados de forma que resultassem em uma velocidade média de arame de 5,0 m/min. Para o processo pulsado a parametrização seguiu a premissa de uma gota por período e diâmetro de gota igual ao do arame, garantindo estabilidade e controlabilidade ao mesmo, conforme a metodologia proposta por Amin [13]. Já para o processo com alimentação dinâmica, o levantamento de

parâmetros foi realizado de forma empírica com o auxílio de ferramentas de medição de variáveis de soldagem. Os parâmetros essenciais levantados para ambos processos se encontram na Tabela 6.2.

Tabela 6.2 - Principais parâmetros dos processos.

	Pulsado	AD
Ip (A)	380	280
tp (ms)	1,9	4,0
Ib (A)	95	100
tb (ms)	7,7	-
Ic (A)	-	70
Va (m/min)	5,0	5,0

Para realização das análises, em todos os ensaios foram adquiridos os parâmetros elétricos de soldagem com taxa de aquisição de 5 kHz. O resultado dos depósitos foi avaliado em inspeção visual e macrografia de seção transversal. O cálculo da diluição foi realizado conforme a Equação 6.1, onde A_r representa a área do reforço e A_p a área penetrada.

$$d_{\%} = \frac{A_p}{A_r + A_p} \cdot 100 \quad 6.1$$

Foram realizados ensaios de um único passe para diferentes percentuais relativos entre ciclos de pulsado e ciclos de MIG/MAG AD, conforme indicado na Tabela 6.3. O objetivo é analisar a influência da alternância de modos de transferência bem como a proporção entre modos na diluição e no aspecto superficial do depósito sem a influência dos passes subsequentes em operações verticais. Para atingir as proporções definidas, determina-se ainda o macropêriodo como 4 períodos de transferência metálica, seja esta por voo livre, para o caso do MIG/MAG Pulsado, ou curto-circuito.

Tabela 6.3- Matriz de ensaios para cordões individuais.

	% Pulsado	% MIG AD
Ensaio 1	100	0
Ensaio 2	0	100
Ensaio 3	75	25
Ensaio 4	50	50
Ensaio 5	25	75

6.1.2 Resultados e Discussões

O primeiro ensaio consistiu na execução de um depósito utilizando o processo MIG/MAG pulsado, cujos parâmetros foram levantados em ensaios anteriores. O processo foi devidamente parametrizado de forma a resultar em uma gota por período com o destacamento da mesma durante a etapa de base. A aquisição de dados realizada durante o ensaio pode ser visualizada na Figura 6.3.

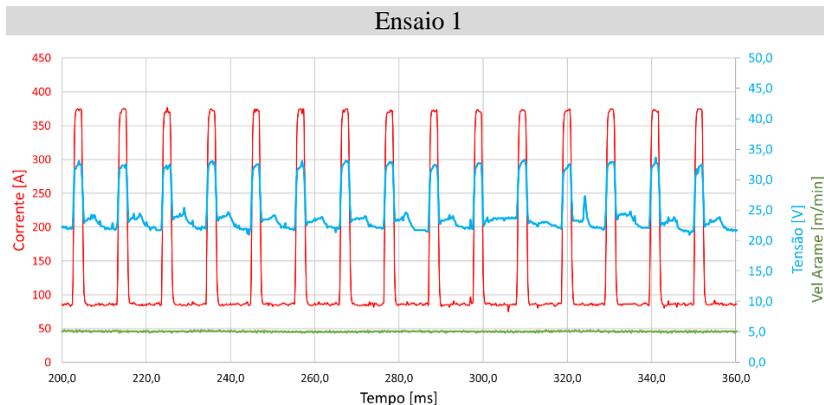


Figura 6.3 - Oscilogramas de corrente, tensão e velocidade de arame para o Ensaio 1 (100% Pulsado).

Nota-se que durante o tempo de base há um pico de tensão, indicativo do destacamento de gotas para os processos cujo modo de transferência metálica se dá por voo livre, a exemplo do pulsado, fenômeno descrito por Amin [13]. A regularidade da transferência observada no oscilograma da Figura 6.3 também aponta para a estabilidade e controlabilidade alcançada com o processo. O destacamento de gotas, a regularidade e comportamento geral do processo foi confirmado por meio da filmagem em alta velocidade. Alguns quadros, bem como os respectivos instantes no período, do ensaio 1 estão mostrados na Figura 6.5. Na figura também é disponibilizado o *QR code* para acesso ao vídeo.

O segundo ensaio constituiu da execução de um depósito utilizando o processo MIG/MAG AD com transferência unicamente por curto-circuito (0% pulsado), de forma controlada e sincronizada com o movimento do arame. Na Figura 6.4 é mostrado o oscilograma referente a este ensaio.

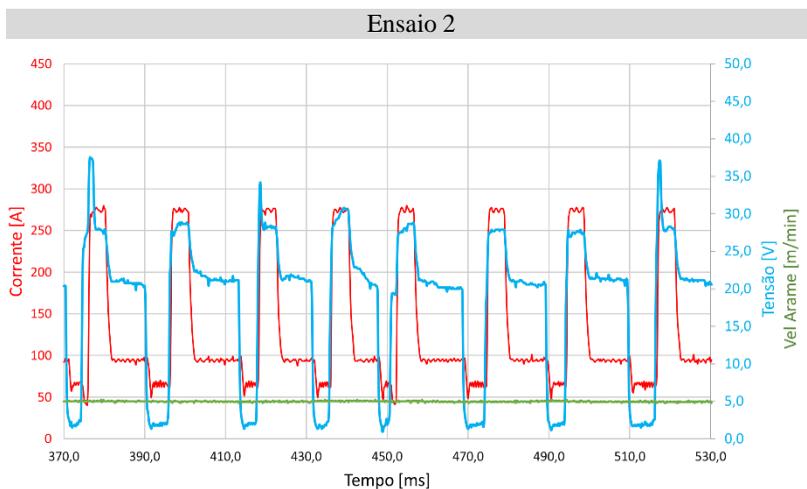


Figura 6.4 - Oscilogramas de corrente, tensão e velocidade de arame referente ao Ensaio 2 (0% Pulsado).

Os demais experimentos foram realizados com o processo MIG/MAG AD-P, processo resultante da alternância entre os modos pulsado e curto-circuito AD. Os mesmos parâmetros regulados para os processos dos ensaios anteriores foram utilizados, variando-se apenas a quantidade de períodos em transferência pulsada/curto-circuito. Em uma analogia pode-se comparar ao que se tem em um pulsado térmico, com dois níveis de energia. A principal diferença é que no MIG/MAG AD-P a variação de energia é acompanhada por diferentes modos de transferência e, para a condição ensaiada, a velocidade de arame resultante em cada uma das fases seria a mesma.

Os ensaios seguiram as proporções previamente definidas na metodologia. O Ensaio 3 foi realizado com uma proporção de 75% do macroperíodo no processo pulsado. A Figura 6.6 mostra os oscilogramas de tensão corrente e velocidade de arame referentes a este ensaio. Na figura, é possível observar três pulsos de maior intensidade seguidos por uma etapa de curto-circuito, indicada pela curva de tensão. Esta sequência forma o macroperíodo do processo na proporção de 75% e se repete ao longo da execução.

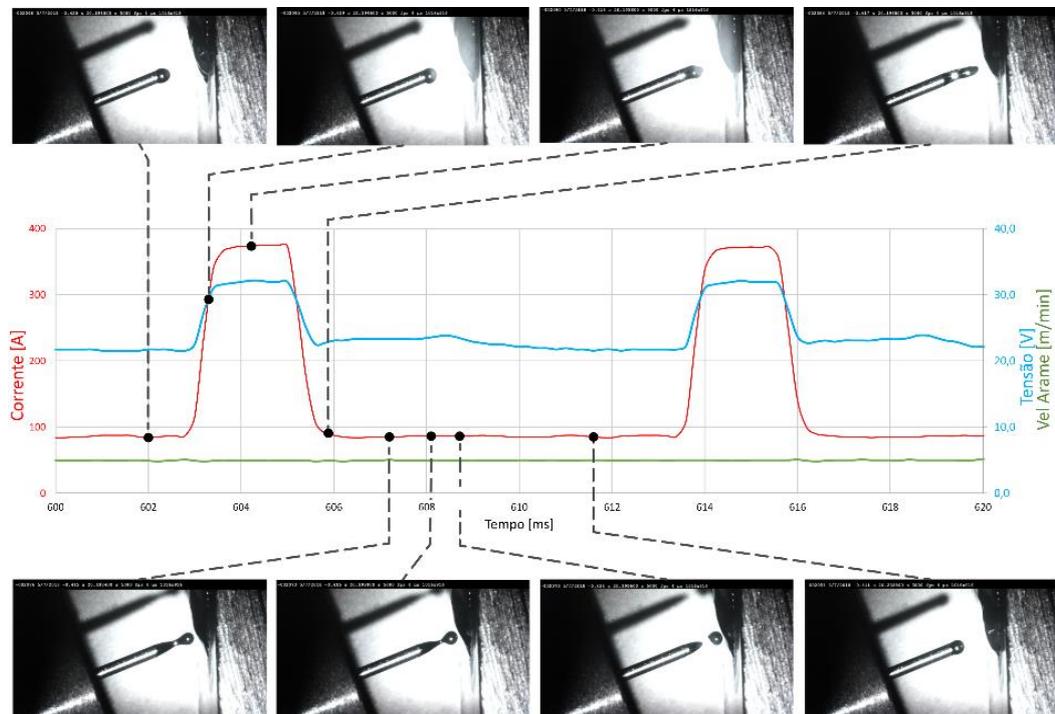


Figura 6.5 - Detalhamento do período de transferência do processo MIG/MAG pulsado regulado. Arame de Inconel 625 ($\phi 1,2$ mm), $V_a = 5,0$ m/min, $I_m = 150$ A.

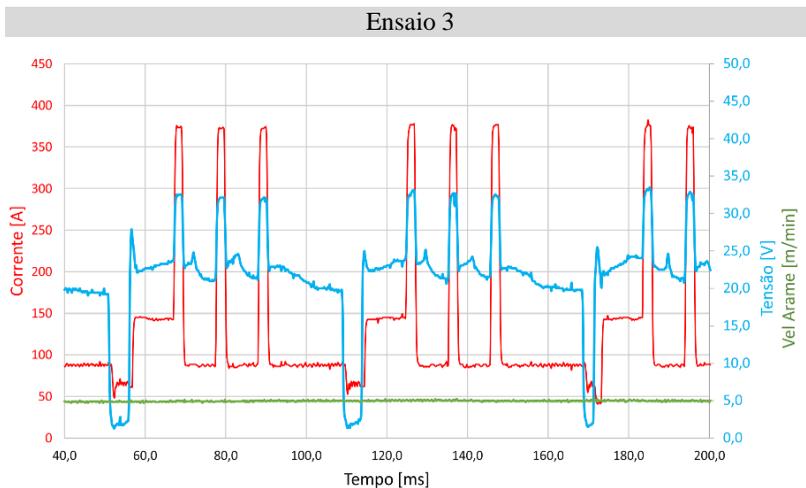


Figura 6.6 - Oscilogramas de corrente, tensão e velocidade de arame referente ao Ensaio 3 (75% Pulsado).

O Ensaio 4 foi definido na proporção de 50% do macroperíodo em transferência pulsada e 50% por curto-circuito. Pode-se observar, nos oscilogramas da Figura 6.7, a forma de onda do macroperíodo resultante dessa proporção definida.

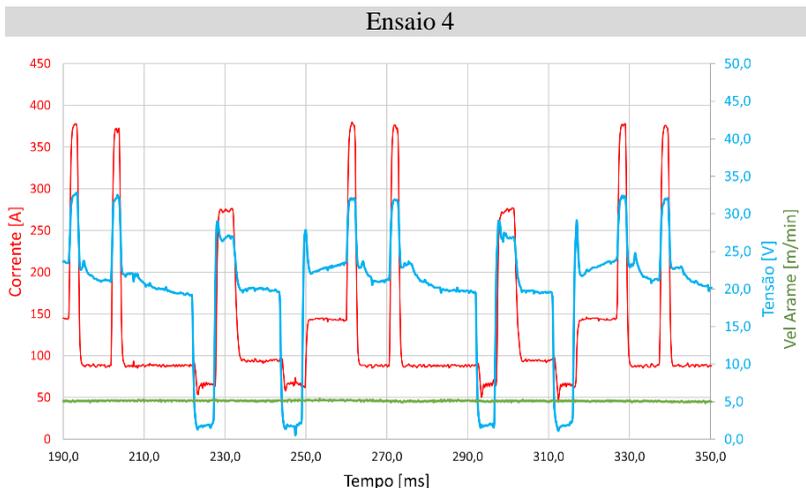


Figura 6.7 - Oscilogramas de corrente, tensão e velocidade de arame referente ao Ensaio 4 (50% Pulsado).

A última proporção definida, de 25%, foi conduzida no Ensaio 5. Pode-se observar nos oscilogramas da Figura 6.8 a forma de onda resultante neste ensaio, na qual três períodos de curto-circuito antecedem um único período de transferência pulsada.

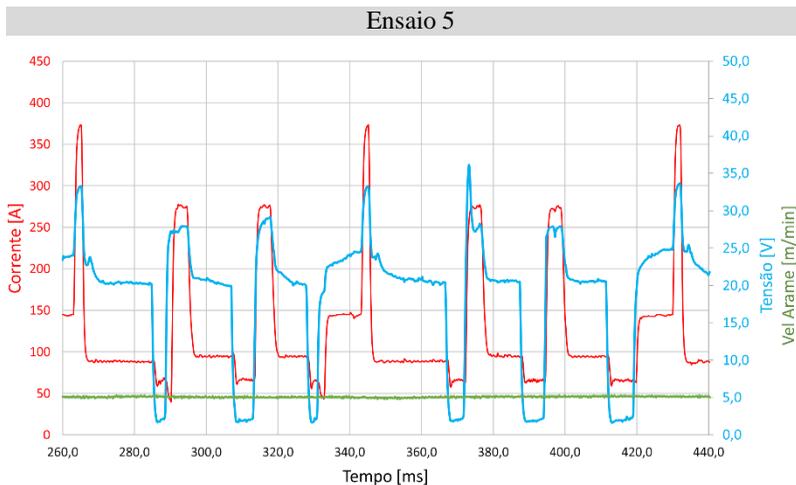


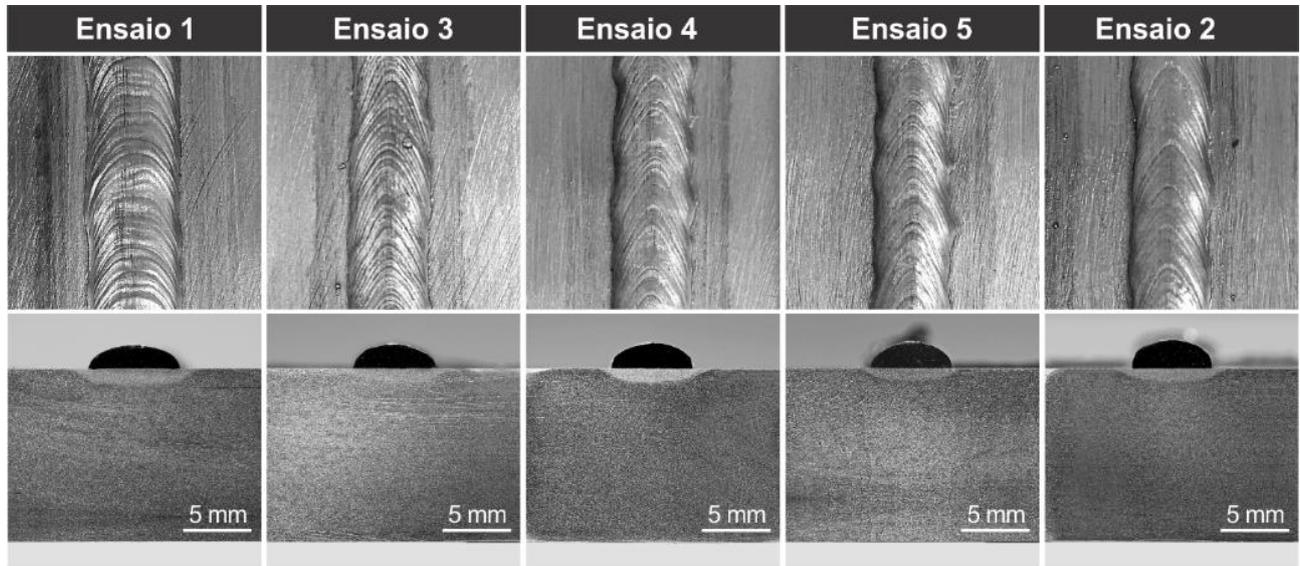
Figura 6.8 - Oscilogramas de corrente, tensão e velocidade de arame referente ao Ensaio 5 (25% Pulsado).

As seções transversais dos corpos de prova ensaiados foram preparadas para análise metalográfica. As imagens obtidas estão expostas na Figura 6.9, juntamente com o aspecto superficial dos cordões depositados. A medição de dados referentes a largura, altura e ângulo de contato do reforço destes ensaios pode ser visualizada na Tabela 6.4. Os parâmetros elétricos médios obtidos na aquisição de dados durante a execução dos ensaios foram reunidos e são apresentados na Tabela 6.5.

Tabela 6.4. Dados das seções transversais dos depósitos.

100 % ← Aumento na proporção pulsado/curto-circuito → 0 %

	Ensaio 1	Ensaio 3	Ensaio 4	Ensaio 5	Ensaio 2
Altura do reforço (mm)	1,7	1,8	1,9	2,0	2,0
Largura do reforço (mm)	6,7	5,9	6,0	6,0	5,8
Ângulo de contato (°)	109	98	103	103	91



100 % ← ————— Aumento na proporção Pulsado / Curto-circuito ————— 0 %

Figura 6.9. Secção transversal e aspecto superficial dos depósitos efetuados na posição vertical descendente.

Tabela 6.5 - Parâmetros elétricos médios dos ensaios para o processo AD-P.

100 % ← — Aumento na proporção pulsado/curto-circuito — → 0 %

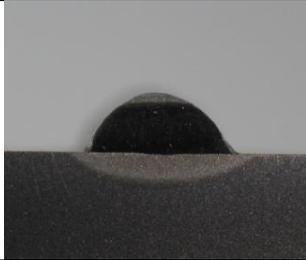
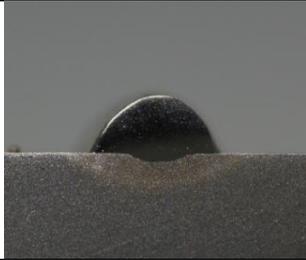
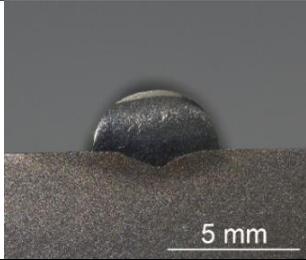
Valores médios	Aumento na proporção pulsado/curto-circuito				
	Ensaio 1	Ensaio 3	Ensaio 4	Ensaio 5	Ensaio 2
Corrente [A]	143	127	125	121	129
Tensão [V]	24,6	22,1	20,1	18,9	18,5
Potência [W]	3899	3159	2898	2669	2920

Com relação à largura do reforço, pode-se verificar que o aumento no número de pulsos gera um maior espalhamento do cordão, fato proveniente do maior aporte térmico fornecido, uma vez que a velocidade de alimentação permanece constante. De forma semelhante, observa-se os efeitos do maior aporte térmico na altura do reforço. Como existe uma maior tendência a melhorar os níveis de molhabilidade do depósito com o aumento na proporção de pulsos, conseqüentemente a altura do reforço segue a direção inversa, quanto maior o aporte térmico fornecido no depósito, menor será a altura do reforço. Dessa forma, há sempre um comprometimento entre molhabilidade e altura do reforço que deverá ser considerado nas especificações de um procedimento de revestimento.

As informações acerca destes ensaios revelaram uma diluição muito baixa para todas condições, o que contraria as informações encontradas no trabalho de Pang et al. [34] Entretanto, Carvalho [50] destaca que a penetração e a diluição na posição vertical são significativamente menores do que na posição plana. Tal fato se origina da tendência natural do escorrimento da poça de fusão que atua, nesta situação, como uma camada protetora sobre o metal de base. Dessa forma há a diminuição do impacto do arco elétrico e da deposição metálica no metal de base, afetando na taxa de diluição do procedimento.

Para verificar os efeitos da posição de soldagem na diluição e evidenciar diferenças entre os depósitos, foram realizados ensaios na posição plana, também utilizando a liga 625. Os parâmetros do Ensaio 1 (100% pulsado), Ensaio 2 (0% pulsado) e Ensaio 4 (50% pulsado) foram mantidos e novos experimentos foram conduzidos. As secções transversais dos corpos de prova foram devidamente preparadas e o resultado da maior potência fornecida pelo modo pulsado foi evidenciado, de acordo com os resultados reportados por Pang et. Al. A Tabela 6.6 mostra as secções transversais dos depósitos na posição plana, juntamente com a taxa de diluição determinada.

Tabela 6.6 - Secção transversal dos depósitos efetuados na posição plana e respectivas diluições.

	<p>MIG/MAG AD (0% Pulsado) Posição plana Im = 129A</p> <p>Diluição: 1,57%</p>
	<p>MIG/MAG AD-P (50% Pulsado) Posição plana Im = 125 A</p> <p>Diluição: 8,47%</p>
	<p>MIG/MAG pulsado (100% Pulsado) Posição plana Im = 143 A</p> <p>Diluição: 11,26%</p>

Os parâmetros referentes à potência média de cada ensaio, mostrados na , indicam um aparente desequilíbrio entre as proporções definidas neste estudo. Esperava-se que a potência média decrescesse conforme a proporção de pulsos de corrente também decrescesse. Entretanto, observa-se que o ensaio cuja transferência metálica se dá exclusivamente por curto-circuito (Ensaio 2) apresenta uma potência média maior que o ensaio de proporção 50% (Ensaio 4).

A explicação para esse fato provém da atuação das etapas de transição inseridas entre os modos de transferência. Tomando-se como base a divisão da Figura 6.1, foi levantada uma média de duração de cada etapa envolvida no processo AD-P. Levantou-se ainda os valores de potência média de cada etapa, por meio da análise dos oscilogramas dos ensaios realizados. As informações obtidas são apresentadas na Tabela

6.7. A partir dessas informações, foi calculada a média teórica do processo AD-P nas diferentes proporções ensaiadas, ponderando-se cada etapa com sua respectiva duração. Neste momento, considerando os ensaios nos quais o macroperíodo foi estabelecido em 4 períodos de transferência. O resultado do cálculo da potência teórica pode ser comparado com o que foi obtido experimentalmente no gráfico da Figura 6.10.

Tabela 6.7 - Potência média de cada etapa dos modos de transferência do MIG/MAG estudados.

Processo	Etapa	Potência [W]	Duração [ms]
AD	Pulso	7879	4,2
	Base	2238	10,2
	Curto	161	4,7
	Total	2968	19,1
Pulsado	Pulso	11769	1,9
	Base	2196	7,7
	Total	4091	9,6
Transição	AD → P	3471	9,6
	P → AD	2054	10,4
	Total	2734	20,0

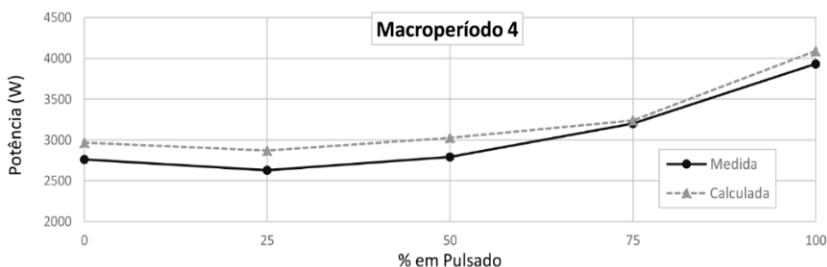


Figura 6.10 - Médias da potência teórica e a medida em cada proporção do processo AD-P para o macroperíodo de 4 períodos de transferência.

Pode-se perceber pelo gráfico que a potência medida acompanha o resultado esperado. O fato de a potência média não crescer linearmente com o aumento da proporção da componente do modo pulsado, para este conjunto de ensaios, é explicado pelo alto percentual relativo ao tempo em que o processo se encontra em fase de transição entre processos e o tempo total do macroperíodo, conforme reportado na Tabela 6.8. Assim, o resultado da potência média tem uma ponderação alta referente à

potência das etapas de transição, que chega a corresponder a 37,4% do macroperíodo no Ensaio 3, por exemplo.

Tabela 6.8 - Duração de cada etapa e percentual relativo às transições no macroperíodo total para os ensaios com macroperíodo de 4 períodos.

Ensaio (% pulsado)	Duração da etapa [ms]				Total	% relativo
	AD	AD → P	Pulsado	P → AD		
Ensaio 2 (0%)	76,4	-	-	-	76,4	0%
Ensaio 5 (25%)	42,9	9,6	9,6	10,4	72,5	27,6%
Ensaio 4 (50%)	23,8	9,6	19,2	10,4	63,0	31,7%
Ensaio 3 (75%)	4,7	9,6	28,8	10,4	53,5	37,4%
Ensaio 1 (100%)	-	-	38,4	-	38,4	0%

Visando diminuir a influência das etapas de transição no resultado de potência média fornecida pelo processo AD-P foi realizado um novo conjunto de ensaios. Nestes, alterou-se o macroperíodo de forma a totalizar 40 períodos de transferência e manteve-se as proporções de 25%, 50% e 75% do processo em modo pulsado. O oscilograma de tensão e corrente para o ensaio na proporção de 50% em modo pulsado (20 períodos em curto-circuito AD e 20 períodos do processo pulsado) é mostrado na Figura 6.11.

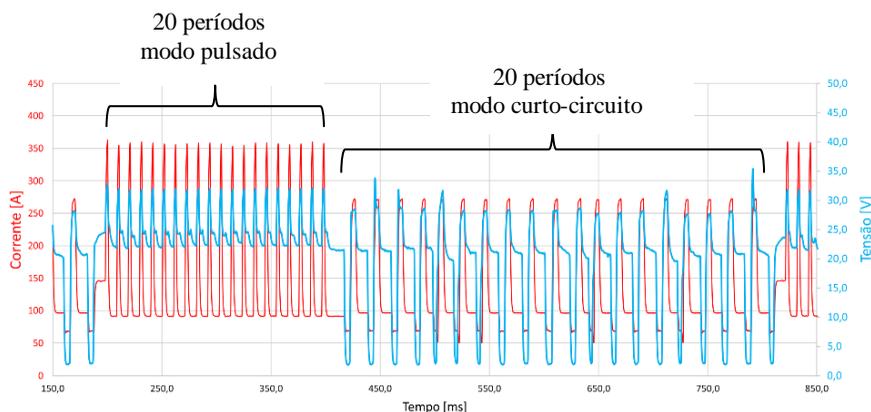


Figura 6.11 - Oscilogramas de corrente e tensão do processo AD-P com macroperíodo igual a 40 períodos e proporção em 50% no modo pulsado.

O cálculo da potência média teórica foi novamente aplicado, considerando as novas ponderações de duração de cada etapa. A potência média obtida nos ensaios e a potência obtida por cálculo é mostrada graficamente na Figura 6.12. Também foi calculado o percentual de tempo em que o processo se encontra nas etapas de transição em relação à duração total do macroperíodo. Este resultado é apresentado na Tabela 6.9.

Tabela 6.9 - Duração de cada etapa e percentual relativo às transições no macroperíodo total para os ensaios com macroperíodo igual a 40 períodos.

Ensaio (% pulsado)	Duração da etapa [ms]					% relativo
	AD	AD → P	Pulsado	P → AD	Total	
Ensaio 2 (0%)	764,0	-	-	-	764,0	0%
Ensaio 5 (25%)	558,6	9,6	96,0	10,4	674,6	3,0%
Ensaio 4 (50%)	367,6	9,6	192,0	10,4	579,6	3,5%
Ensaio 3 (75%)	176,6	9,6	288,0	10,4	484,6	4,1%
Ensaio 1 (100%)	-	-	384,0	-	384,0	0%

Nota-se que, quando o processo é ajustado de forma que a permanência do processo em etapas de transição não representa um percentual significativo do macroperíodo, a resultante de potência média varia relativamente de forma linear com o aumento da proporção em modo pulsado, como esperado.

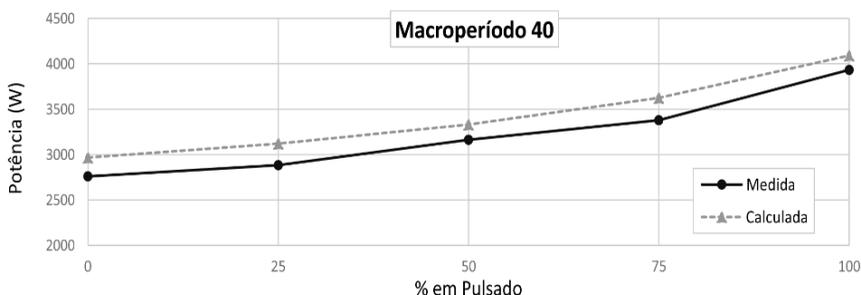


Figura 6.12 - Comparação entre as médias da potência teórica calculada e a medida em cada proporção do processo AD-P para o macroperíodo composto por 40 períodos de transferência.

6.1.3 Conclusões

Para as condições ensaiadas neste trabalho, o aumento da proporção de pulsos de corrente em um macroperíodo no processo MIG/MAG AD-P é benéfica com relação a molhabilidade do depósito. Não foram observados efeitos na diluição para aplicações verticais. Por outro lado, em posição plana, esse efeito foi evidenciado, aumentando a diluição à medida que se aumenta o número de períodos de transferência por corrente pulsada. A hipótese levantada é de que, na posição vertical sentido descendente, a poça escorre para baixo, atuando como uma barreira e atenuando um dos efeitos mais atuantes no perfil de penetração/diluição que é o momentum (impacto) das gotas [55] [56].

Para procedimentos de revestimento com a liga 625 em aplicações em posição vertical, o uso de processos que fornecem um maior aporte térmico se mostrou mais indicado. O emprego do MIG/MAG AD-P pode ser benéfico quando ajustado em faixas de maiores energias, como por exemplo 90% pulsado. O uso eventos de transferência por curto-circuito, mesmo em baixas proporções, pode promover um melhor controle térmico sobre a poça de fusão, evitando efeitos observados com a utilização do processo puramente pulsado, como o escorrimento da poça de fusão mesmo em baixas taxas de deposição. Outro fator que torna o MIG/MAG AD-P atraente é o fato de possibilitar o controle da altura do arco periodicamente para o processo, uma vez que há um cíclico contato entre o arame e a poça de fusão e um posterior retorno do arame por um comprimento de arco predeterminado. Este contato e retorno do arame pode contornar um eventual desequilíbrio na transferência metálica e evitar oscilações no comprimento médio do arco.

6.2 EXPLORAÇÃO DA TÉCNICA DE MERGULHO VISANDO OPERAÇÕES DE MANUFATURA ADITIVA

As crescentes aplicações de processos de soldagem voltadas à manufatura aditiva incentivaram a exploração de técnicas que visam uma maior controlabilidade da evolução térmica da poça, da solidificação e geometria do cordão, adaptando o processo a diferentes condições e requisitos de aplicação (características metalúrgicas de materiais, características termofísicas dos materiais, placa base, espessura de parede, altura de parede, inclinação de parede, resolução lateral da parede, etc.). O elevado período de trabalho, com o arco aberto, promove um gradativo acúmulo dessa forma de energia na peça, o que é desfavorável ao procedimento de manufatura aditiva [51] [52] [53]. A maioria dos estudos buscam promover o resfriamento da peça em construção [51] [52] [54], neste trabalho é proposta uma estratégia para a utilização da energia proveniente da fonte de forma mais eficiente.

A proposta é a imersão do arame na poça de fusão para que haja uma propagação de calor da poça de fusão para o arame sólido. O princípio que fundamenta o funcionamento da estratégia proposta é a condução térmica. Como a condução se dá proporcionalmente a área de contato entre corpos, quanto mais o arame se adentrar a poça e/ou mais tempo permanecer em contato com a mesma, maior será o efeito da troca de calor. Dessa forma, há o benefício do resfriamento da poça de fusão, ao passo que há o pré-aquecimento da parcela de arame que será fundida e depositada no período de transferência seguinte.

O objetivo desse estudo é avaliar os efeitos térmicos do mergulho do arame na poça de fusão de forma cíclica e controlada, a cada período de transferência.

6.2.1 Metodologia

Os ensaios desta etapa consistiram em depósitos sobre chapas de alumínio de 6,0 mm de espessura, 50 mm de largura e 176 mm de comprimento. Como metal de adição foi utilizado o arame ER4043 de 1,2 mm de diâmetro. Como proteção gasosa foi utilizado gás argônio comercialmente puro, a uma vazão de 17 l/min.

Para que haja uma comparação direta em termos do aporte térmico é necessário que o consumo médio de arame seja igual para todos os ensaios. O princípio de funcionamento da estratégia de mergulho interfere diretamente no período de transferência, principalmente no período de curto-circuito, conforme reportado no item 5.2.4. Visando contornar esta

problemática, buscou-se alterar os parâmetros que influem diretamente no tempo de curto-circuito. A medida que há o aumento do parâmetro de mergulho aumentou-se proporcionalmente a velocidade de recuo de arame, intencionando manter o período de curto relativamente constante.

Os parâmetros levantados para os ensaios são apresentados na Tabela 6.10. O restante de parâmetros, comuns a todos ensaios, são expostos na Tabela 6.11. Vale ressaltar que houve a necessidade de limitar o parâmetro de mergulho em 3,0 ms devido a irregularidades no procedimento, observadas em ensaios prévios. A velocidade de soldagem também foi definida a partir de ensaios prévios. Este parâmetro é determinante para o sucesso da estratégia de mergulho, uma vez que o deslocamento muito rápido da tocha pode fazer com que o arame colida com uma parte sólida da peça, gerando *stutting*. Este fato foi reportado no item 5.2.4.

Tabela 6.10 – Principais parâmetros do estudo utilizados em cada ensaio.

	Mergulho [ms]	Atraso [ms]	Vr [m/min]	Va média [m/min]
Ensaio 1	0,0	0,0	20,0	3,5
Ensaio 2	2,0	0,0	35,0	3,5
Ensaio 3	3,0	0,0	50,0	3,5

Tabela 6.11 – Parâmetros comuns a todos ensaios.

Parâmetro	Valor
Vap e Vab	50,0 m/min
Ipa	160 A
Iba	75 A
Ic	50 A
tpa	3,5 ms
CArc	0,2 mm
Vs	15 cm/min

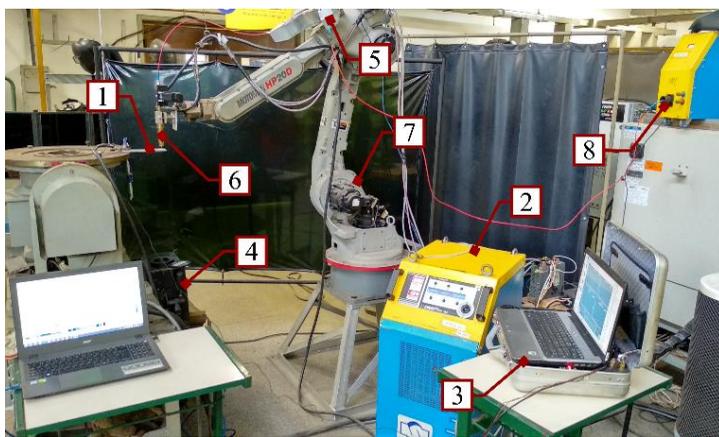
Objetivando observar o fluxo térmico na peça, foram conduzidos experimentos realizando a filmagem termográfica da face posterior à solda do corpo de prova. A Figura 6.13 mostra a bancada utilizada neste estudo, indicando dos equipamentos utilizados. O aspecto superficial dos depósitos foi avaliado em inspeção visual e macrografia de seção transversal.

A medição de temperatura dos corpos de prova é realizada pelo software de tratamento e captura de imagens Altair. Para a utilização deste software é necessário o ajuste de alguns parâmetros radiométricos, os quais são mostrados na Tabela 6.12.

Tabela 6.12 – Parâmetros radiométricos para filmagem termográfica.

Emissividade	0,3
Temperatura ambiente	25 °C
Coefficiente de transmissão	97%
Distância câmera-peça	0,85 m
Intervalo de aquisição	5-300 °C

Como se tratam de chapas de alumínio, foi necessário a utilização de valores relativamente baixos de emissividade. Além disso, para a proteção da lente da câmera, utilizou-se uma janela de inspeção posicionada a sua frente, o que exigiu a utilização do parâmetro denominado de coeficiente de transmissão, regulado em 97%.



1	Corpo de prova
2	Fonte de soldagem
3	SAP V4 IMC-Soldagem
4	Câmera termográfica FLIR
5	Buffer de arame
6	Protótipo de tocha construído
7	Robô antropomórfico HP20 da Yaskawa-Motoman
8	Cabeçote de arame

Figura 6.13 - Bancada de ensaios e disposição dos equipamentos para a filmagem termográfica.

6.2.1 Resultados e Discussões

A seleção de parâmetros permitiu a execução de ensaios em diferentes condições de mergulho mantendo-se a velocidade de alimentação média em 3,5 m/min. Nestes ensaios foi realizada a aquisição de imagens no campo infravermelho a fim de comparar o gradiente térmico formado em cada ensaio.

Com o objetivo de realizar a comparação térmica foram selecionados os quadros referentes aos instantes finais dos depósitos de modo que temperatura atingida pela peça ao longo do procedimento também fosse observada. Traçou-se uma linha vertical centralizada na poça de fusão (região mais quente). O software Altair fornece as informações sobre temperatura, ponto a ponto, ao longo da demarcação. As imagens contendo o gradiente térmico dos quadros selecionados são exibidas na Figura 6.14 o resultado de medição de temperatura ao longo da demarcação é exposto na Figura 6.15, agregando todos os ensaios.

Analisando as imagens da Figura 6.14, é possível notar a redução na área saturada, acima de 300 °C e exibidas em rosa, da poça de fusão. A saturação ocorre devido à presença do arco elétrico que aquece localmente a peça atingindo temperaturas superiores ao intervalo de aquisição configurado. A medida que se aumenta o intervalo de mergulho, menor é a concentração de calor observada na região da poça de fusão nas imagens.

O perfil de distribuição de temperatura ao longo da demarcação permite concluir quantitativamente acerca da distinção entre o uso da técnica de mergulho. O ensaio 1, sem mergulho, apresentou o maior pico de temperatura, pouco acima de 300 °C, enquanto que o ensaio 3 apresentou o menor pico, próximo de 280 °C. Ainda se observa toda a curva do primeiro ensaio com valores superiores aos da curva do ensaio 3. A distribuição térmica do ensaio 2 ocupa uma posição intermediária, embora assuma, localmente, valores superiores que o ensaio 1 e inferiores que o ensaio 3.

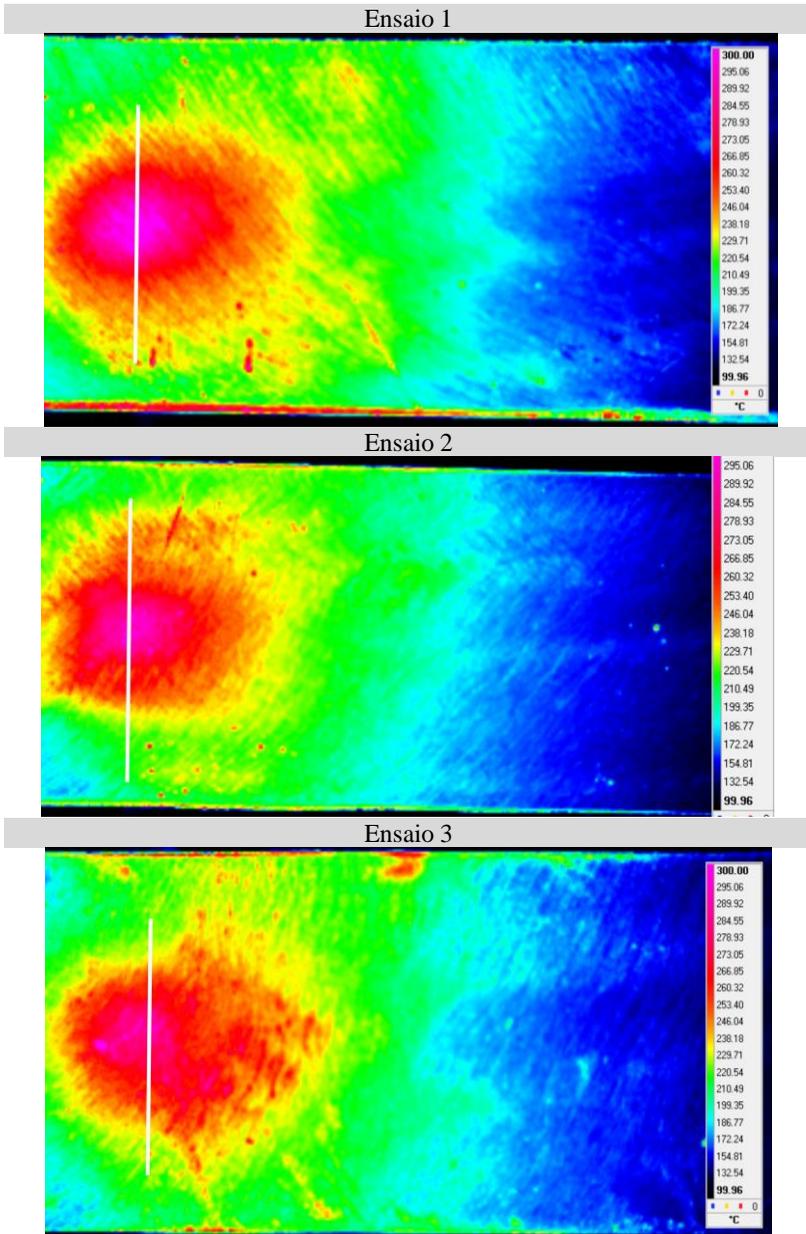


Figura 6.14 – Imagens termográficas das faces posteriores de chapa nos instantes finais do procedimento.

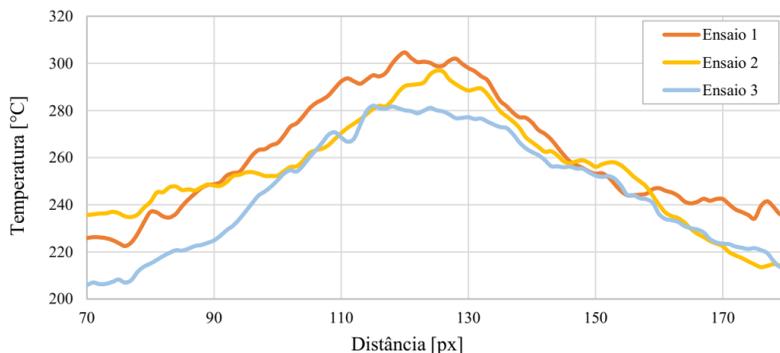


Figura 6.15 – Perfis de temperatura das regiões demarcadas (traço vertical branco) na Figura 6.14.

O aspecto superficial dos cordões depositados pode ser observado na Figura 6.16. A Tabela 6.13 reúne os valores médios de variáveis elétricas e de velocidade de arame resultante dos ensaios.

Apesar de os valores médios das variáveis elétricas expostas na Tabela 6.13 não divergirem muito entre os ensaios, a diferença entre o aspecto superficial dos depósitos, observadas na Figura 6.16, é evidente. Destaca-se a perda gradativa de uniformidade do primeiro para o terceiro ensaio, assim como a diminuição da altura do cordão. Nos ensaios de número 2 e 3 percebe-se, ainda, descontinuidades formadas ao longo do cordão. Tais resultados entram em acordo com os gradientes térmicos observados na Figura 6.14.

Tabela 6.13 – Valores médios para variáveis do processo.

	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3
Corrente [A]	70	71	74
Tensão [V]	8,0	8,2	8,5
Potência [W]	863	843	876
Vel. Arame [m/min]	3,5	3,5	3,5

Outro fator relevante neste estudo inicial é relacionado com a velocidade de soldagem. Conforme citado anteriormente, esse parâmetro foi definido baseado em ensaios prévios e teve como sustentação os dados relacionados ao *sticking* provocados pelo mergulho do arame. A velocidade usada nos experimentos é considerada baixa quando comparada a procedimentos voltados a manufatura aditiva, os quais utilizam valores a partir de 30 cm/min até 95 cm/min [52] [53] [54].

Contudo, não existe nenhum empecilho de cunho científico ou operacional que limite este parâmetro. O que torna qualquer procedimento viável é a reunião dos vários parâmetros que atuam concomitantemente.

Posto isso, levanta-se a questão cerne deste estudo inicial. Para que fosse possível utilizar a técnica de mergulho, visando reduzir o acúmulo de calor no substrato durante o procedimento, foi necessário reduzir consideravelmente a velocidade de soldagem. Essa redução de velocidade, por consequência, resulta em um tempo de soldagem maior, se comparado a uma parametrização de maior potência. Dessa forma, tem-se a possibilidade de que o acúmulo de calor ao fim do depósito seja equiparável ao procedimento mais energético, porém mais rápido. Há de se ressaltar, ainda, o impacto na geometria dos depósitos. O depósito realizado com uma maior potência tenderia a formar um cordão de maior molhabilidade, mais largo, e menor altura, em concordância com os resultados exibidos na Figura 6.16. Em contrapartida o depósito resultante do emprego da técnica de mergulho tenderia a possuir maior altura e pouca molhabilidade.

Na situação hipotética levantada, com os dois procedimentos resultando em uma acumulação de calor resultante semelhante, aquele de melhor adequação seria dependente, exclusivamente, dos requisitos geométricos da peça em construção. Conjecturando uma aplicação de WAAM, essa ponderação entre velocidade de soldagem e altura do depósito pode ser benéfica, entretanto carece de mais estudos focados em passes subsequentes e acompanhamento do gradiente térmico.

6.2.2 Conclusões

Os resultados obtidos pelo uso da estratégia de mergulho de arame na poça de fusão apontam para um promissor desenvolvimento se tratando de controle térmico sobre o depósito. Entretanto, estudos posteriores são necessários visando sanar questões sobre o acúmulo de calor resultante ao final da construção de uma peça, por exemplo, juntamente com as informações acerca da geometria de cada passe sucessivo.

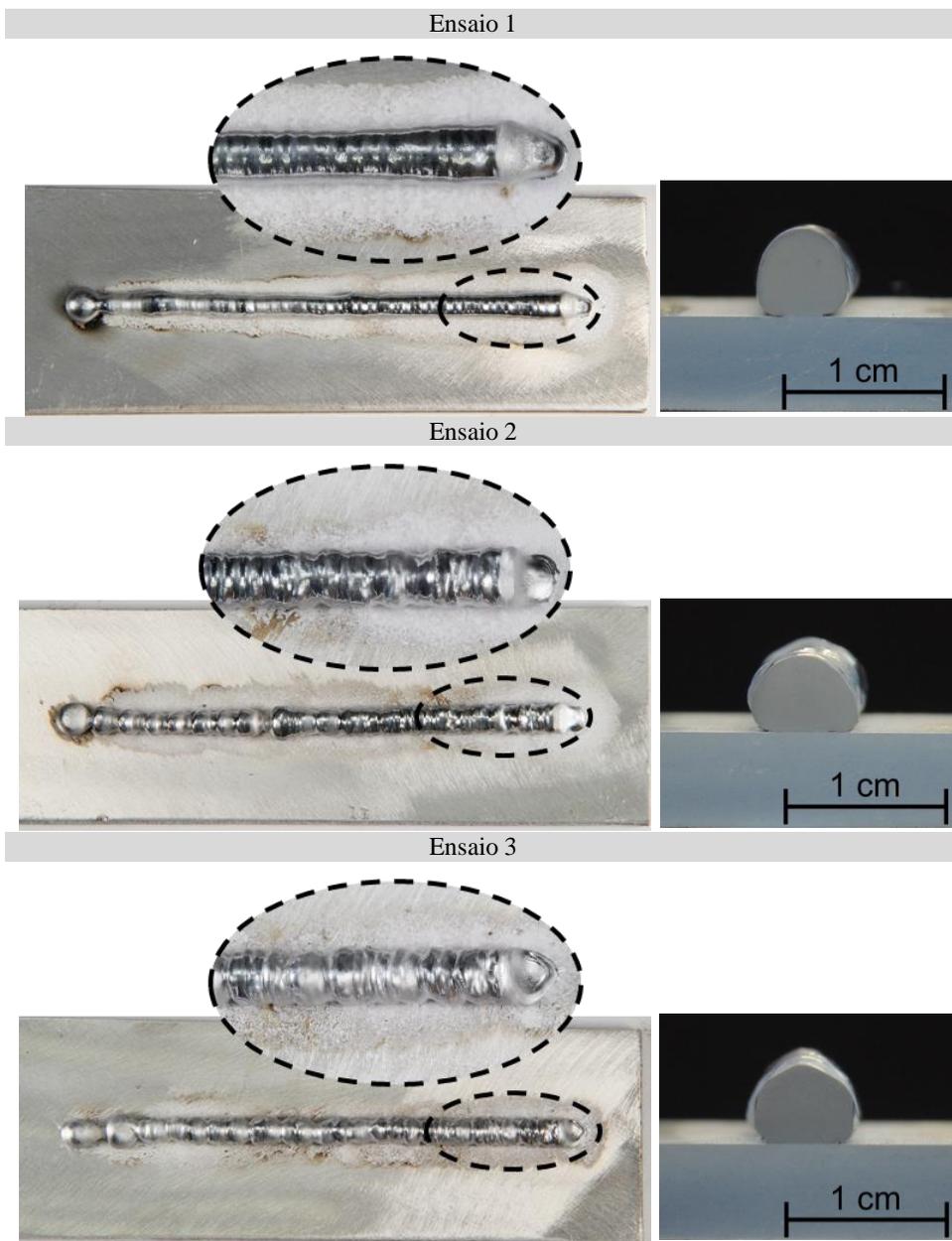


Figura 6.16 – Aspecto superficial e secção transversal dos cordões depositados.

7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

7.1 CONCLUSÕES

O progresso alcançado ao longo da concepção deste trabalho permite avaliar, de forma geral, positivamente o resultado atual do desenvolvimento. O sistema permite ao usuário a alteração de diversos parâmetros em todas as etapas da transferência metálica, possibilitando alterar o perfil de movimentação do arame, bem como os níveis de corrente. Dessa forma, respeitou-se a premissa preestabelecida de flexibilidade para o desenvolvimento do protótipo.

Com relação aos subsistemas que compõem o MIG/MAD AD pode-se concluir que:

- O mecanismo de medição acoplado ao *buffer*, ainda que simples, se provou eficaz, juntamente com a sintonia de controle concebida. Este desenvolvimento proporcionou segurança e melhorou a usabilidade do sistema do MIG/MAG AD.
- O software embarcado na fonte de soldagem se mostrou estável e atingiu a precisão necessária requerida para o controle dos subsistemas, dentre os quais destacam-se o subsistema do *buffer* e do servomotor. O nível de controle implementado só é possível a partir da união e interoperação entre software, hardware e instrumentação.

Com relação aos resultados reportados no capítulo de avaliação do desempenho do protótipo pode-se levantar as seguintes conclusões:

- O controle de velocidade implementado se provou fiel, respeitando as referências ajustadas na IHM da fonte de soldagem pelo operador. O controle de posição também se mostrou adequado, o microcontrolador envia a quantidade exata de pulsos para dado deslocamento;
- A estratégia visando a diminuição do atraso inercial no momento da inversão do movimento atingiu níveis de redução deste atraso em cerca de 25% na condição estudada.
- A implementação da técnica de mergulho de arame na poça de fusão no processo MIG/MAG AD provou-se respeitar os parâmetros “mergulho” e “atraso”, configurados na IHM pelo usuário;

- Os parâmetros “mergulho” e “atraso” provocam uma alteração na duração do período de transferência e, conseqüentemente, altera a velocidade de arame média do processo;

O capítulo 6 apresentou breves estudos acerca das possibilidades de aplicações do protótipo e como as modificações inseridas podem ser benéficas nas situações demonstradas, destaca-se que:

- A combinação de modos de transferência em um mesmo procedimento possibilitou um melhor ajuste da faixa de potência que o processo desenvolvido atua. Foram investigados os efeitos de diferentes proporções entre modos de transferência em uma aplicação de revestimento em posição vertical. Nestas condições, não foram reportados efeitos significativos na diluição. Observou-se efeitos na molhabilidade, crescente de acordo com a proporção do modo pulsado. Foi verificado, ainda, que na posição plana, onde não há escorrimento da poça de fusão, o efeito do aumento da diluição é proporcionado pelo aumento da proporção do modo pulsado;
- A configuração do macroperíodo do processo MIG/MAG AD-P é determinante para a linearidade da potência esperada com o aumento do número de períodos de pulsação. Tal fato deriva-se da atuação das etapas transitórias necessárias entre modos de transferência. Em um macroperíodo curto, as etapas de transição representam uma porção significativa do mesmo, impactando nos resultados de potência;
- O emprego da estratégia de mergulho visando um procedimento com um menor acúmulo de calor mostrou-se promissor. O aumento do tempo de mergulho reduz a temperatura na região da poça de fusão e tem um impacto significativo no aspecto superficial do depósito;
- A utilização da estratégia de mergulho somente surte efeito quando a velocidade de soldagem se encontra adequada à técnica. Em caso contrário, o arame se choca com a peça gerando *stubbing*.

7.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O estado atual de desenvolvimento do protótipo permite sua aplicação nos mais diversos procedimentos. Sugere-se estudos visando

uma avaliação minuciosa dos diversos parâmetros focados em uma aplicação em específico. A concepção do MIG/MAG AD-P abre uma gama de possibilidades para inovações em aplicações já consagradas de soldagem a arco, tais como a união metálica, revestimento e manufatura aditiva.

Sugere-se ainda, de forma mais específica, alguns pontos de melhora pontual e de robustez do sistema desenvolvido:

- Implementar o sistema em uma fonte de soldagem AC de modo a expandir o campo de estudos e possibilidades do MIG/MAG AD.
- Elaborar um estudo das etapas de transição entre modos de transferência da variante MIG/MAG AD-P, de modo a otimizar a funcionalidade das mesmas sem comprometer a operacionalidade do processo.
- Promover ensaios com o sistema atuando sem o recurso da alimentação dinâmica e observar o comportamento do controle de velocidade em uma faixa de operação distante da faixa na qual o sistema foi otimizado, velocidades menores que 10 m/min, por exemplo. A relação de passos determinada pode ser ineficiente em situações de velocidade baixa, comprometendo seu controle.
- Projeto e fabricação de uma tocha com as devidas partes sensíveis protegidas e estrutura compatível a procedimentos de soldagem em geral. Sugere-se, ainda, a inclusão de um sistema de refrigeração na mesma, atuando no pescoço e no corpo do servomotor.

REFERÊNCIAS

- [1] MARQUES, C. Análise de técnicas e efeitos físicos da **alimentação dinâmica do arame no processo de soldagem MIG/MAG com vistas ao desenvolvimento de um sistema nacional flexível**. 2017. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- [2] CARY, H. B. **Modern Welding Technology**, 4th ed., Prentice-Hall, 1998.
- [3] SCOTTI, A.; PONOMAREV, V. **Soldagem MIG/MAG: melhor entendimento, melhor desempenho**. 1ª ed. São Paulo: Artliber Editora. 2008.
- [4] MODENESI, P.J. **Fontes de Energia para a Soldagem a Arco**. Universidade Federal de Minas Gerais, 2009.
- [5] GOHR, R.J. **Novos Métodos de Controle da Soldagem MIG/MAG**. 2002. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- [6] BYRD, T. **Inverter Power Sources: An Efficient Alternative**. Welding Journal, vol. 72, pp. 37-40, Janeiro 1993.
- [7] UEYAMA, T. **Welding Power Sources**, Welding International, vol. 24 (9), PP.699-705, 2010.
- [8] FRONIUS UK LTD. **Cold Metal Transfer – Robotics**. Slides de apresentação. 2012.
- [9] KANGERMAN, H.; LUKAS, W.D.; WAHLSTER, W. **Industrie 4.0: Mit dem Internet der Dinge auf dem Weg zur 4. industriellen Revolution**. VDI nachrichten 13.1, 2011.
- [10] SCHWEISSEN & SCHNEIDEN. **First-Class Result for the 19th Schweissen & Schneiden**. Press texts. 2017.
- [11] MISTODIE, L.; JONI, N. **Artificial Intelligence in Welding Processes**. The Annals of “Dunarea de Jos” University of Galati, Fascicle XII, Welding Equipment and Technology, 2009.
- [12] SOUZA, G. L. **Análise e Desenvolvimento de Subsistemas de Comunicação e Processamento de Dados para Integração e Supervisão de Processos de Soldagem**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- [13] AMIN, M. Pulse Current parameters for arc stability and controlled metal transfer in arc welding. **Metal Construction**, nº 15, pp. 272-278, 1983.

- [14] MOTTA, M. F. **Aplicação do Processo MIG/MAG Pulsado com Duplo Arame e Potenciais Isolados em Soldagens de Revestimentos**. 2002. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- [15] RODRIGUES, A. G. **Controle e Atuação do Sistema de Movimentação Dinâmica de Arame em Processos de Soldagem a Arco**. 2016. TCC (Graduação em Engenharia de Controle e Automação) - Universidade Federal de Santa Catarina.
- [16] GALEAZZI, D. 2018. **Soldagem MIG/MAG Orbital com Sensoriamento Laser: Análise de Condições Operacionais e Concepções de Hardware e Software para Aumento de Rigidez e Confiabilidade**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- [17] SILVA, R. H. G. **Soldagem MIG/MAG em transferência metálica por curto-circuito controlado** aplicada ao passe de raiz. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- [18] LINCOLN ELECTRIC. **Surface Tension Transfer (STT)**. Catálogo do Fabricante, acesso em 27/11/2018. Disponível em: <https://www.lincolnelectric.com/assets/US/EN/literature/NX220.pdf>
- [19] FRONIUS INTERNATIONAL GmbH, **The new revolution in digital GMA welding**. Catálogo do fabricante.
- [20] MARQUES, C. **Prospecções da Natureza Física da Soldagem MIG Automática de Ligas de Alumínio**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- [21] PANASONIC. **Catálogo do Fabricante**, acesso em 28/11/2018. Disponível em: http://www.panasonicfa.com/content/active-towers-features#active_wire_feeding
- [22] DAIHEN-ROBOT. **Catálogo do Fabricante**, acesso em 28/11/2018. Disponível em: <https://www.daihen-robot.com/en/items/synchro>
- [23] CLOOS. **Catálogo do Fabricante**, acesso em 28/11/2018. Disponível em: <https://www.cloos.de/de-en/processes/details/motion-control-weld/>
- [24] DVS MEDIA GmbH. **Current Welding Practice: CMT Technology**, 1st ed., English Edition, vol. 11, 2014. ISBN: 978-3-945023-36-5
- [25] OTC DAIHEN, **Catálogo do Fabricante**, acesso em 04/05/2018. Disponível em: <http://www.otc-daihen.de/2779/SynchroFeed-welding-process.htm>

- [26] PANASONIC BUSINESS. Simply Welding: **Integrated Robot Welding System**. Catálogo do Fabricante, acesso em 04/12/2018. Disponível em: <http://pdf.directindustry.com/pdf/panasonic-robot-welding/tawers-integrated-robot-welding-system/29315-741022.html>
- [27] SKS WELDING SYSTEMS. **Catálogo do Fabricante**, acesso em 28/11/2018. Disponível em: <https://www.sks-welding.com/en/torch-systems/single-wire/frontpull-8/product.html>
- [28] DAIHEN, **Catálogo de Produtos**, acesso em 04/12/2018. Disponível em https://www.daihen-robot.com/en/download/catalog?file_path=synchro&file_name=SynchroFeed_Catalog.pdf
- [29] FRONIUS INTERNATIONAL. **TPS/i for CMT**. Catálogo de Produtos, acesso em 04/12/2018. Disponível em <http://www.tps-i.com/en/cmt/>
- [30] ROBOTEC. **Soluções da Empresa**. Disponível em <http://robotec.sk/robotic-welding/?lang=en>
- [31] SILVA, R. H. G.; DUTRA, J. C.; NETO e F. W. C. Elevada performance na fabricação e revestimento de paredes de caldeiras. VII Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica, Rio de Janeiro, 2013.
- [32] PICKIN, C.; WILLIAMS, S. LUNT, M. Characterisation of the cold metal transfer (CMT) process and its application for low dilution cladding. **Journal of Materials Processing Technology**, 211(3), pp.496-502. Março de 2010.
- [33] FRONIUS INTERNATIONAL GmbH. **CMT Pulse: Attractive Synergies**, acesso em 22/11/2018. Disponível em <https://www.fronius.com/en/welding-technology/our-expertise/welding-processes/cmt-pulse>
- [34] PANG, J. et al. Arc characteristics and metal transfer behavior of CMT + P welding process. **Journal of Materials Processing Technology**, 238, pp 212-217. Dezembro de 2016.
- [35] KAZMAIER, J. **CMT Advanced Technology – An Arc Process Revolution**. Fronius International GmbH. Wels-Thalheim, Austria. 2010.
- [36] GU, J. et al. **Wire + Arc Additive Manufacturing of aluminium**. Proceedings of the 25th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin, TX, USA. 2014.
- [37] WILLIAMS, S. W. et al. Wire+ arc additive manufacturing. **Materials Science and Technology**, vol. 32, nº 7, pp. 641-647, 2016.
- [38] WU, Y.; KOVACEVIC, R. Mechanically Assisted Droplet Transfer Process in Gas Metal Arc Welding. **Journal of Engineering Manufacture**, vol. 216, nº Part B, 2001.

- [39] KOLLMORGEN. **Manual do Usuário**, acesso em 20/09/18. Disponível em <http://curvegen.kollmorgen.com/webhelp/workbench/English/>.
- [40] ALCIATORE, D. G.; HISTAND. M. B. **Introduction to Mechatronics and Measurement Systems**, 4th ed., 2012. ISBN 978-0-07-338023-0
- [41] HALL, E. On a New Action of the Magnet on Electric Currents. **American Journal of Science**, 111, pp.200-205. 1880.
- [42] ELECTRONICS TUTORIALS. Documento online, acesso em 10/04/18. Disponível em: <https://www.electronics-tutorials.ws/electromagnetism/hall-effect.html>.
- [43] ALLEGRO MICROSYSTEMS. **3503 Ratiometric, Linear Hall-Effect Sensors. Datasheet.**
- [44] NXP SEMICONDUCTORS. **LPC214x User Manual**. Ver. 4. Manual do Usuário, Abril de 2012.
- [45] IMC SOLDAGEM. SAP – V4.01: Manual do Sistema, 2005.
- [46] KOLLMORGEN. **Kollmorgen AKM Servomotor Selection Guide with AKD Servo Drive Systems**, 2010.
- [47] OSLOM, D. L. et al. **ASM Handbook**, vol. 6. Materials Park, OH: ASM International, p.938, 1993.
- [48] SILVA, R. H. G. et al. **Inovações em Revestimentos Automatizados** de Tubos e Paredes d'Água de Caldeiras de Unidades de Geração Termelétrica para Mitigação de Desgaste. Congresso de Inovação Tecnológica em Engenharia Elétrica, agosto 2015.
- [49] EGERLAND, S. A. Status and Perspectives in Overlaying under Particular Consideration of Sophisticated Welding Processes. **Quarterly Journal of the Japan Welding Society**, 27(2), pp.50s-54s. 2009.
- [50] CARVALHO, R. S. Tecnologias para Execução de **Revestimentos via Soldagem Automática** de Paredes D'água de Usinas Termelétricas. 2015. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- [51] SILVA, F. L. S. **Desenvolvimento de Estratégias para Manufatura Aditiva** via Soldagem a Arco. 2017. TCC (Graduação em Engenharia de Controle e Automação) - Universidade Federal de Santa Catarina.
- [52] MONTEVECCHI, F. et al. Heat Accumulation Prevention in Wire-Arc-Additive-Manufacturing Using Air Jet Impingement. **Manufacturing Letters**, 17, pp.14-18. 2018.
- [53] WU. B. et al. Effects of Heat Accumulation on the Arc Characteristics and Metal Transfer Behavior in Wire Arc Additive Manufacturing of Ti6Al4V. **Journal of Materials Processing Technology**, 250, pp.304-312.

- [54] LI, F. et al. Thermoelectric Cooling-Aided Bead Geometry Regulation in Wire and Arc-Based Additive Manufacturing of Thin-Walled Structures. **Applied Sciences**, 8(2), p.207. 2018.
- [55] ESSERS, R. W. G. Some Aspects of the Penetration Mechanisms in Metal-Inert-Gas (MIG) Welding, **Welding Journal**, vol. 60, pp. 37-42, 1981.
- [56] SCOTTI, A.; RODRIGUES, C. E. A. L. Determination of Momentum as a Mean of Quantifying the Mechanical Energy Delivered by Droplets During MIG/MAG Welding. **The European Physical Journal-Applied Physics**, 45(1). 2009.