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

Cleber Marques

ANÁLISE DE TÉCNICAS E EFEITOS FÍSICOS DA ALIMENTAÇÃO DINÂMICA DO ARAME NO PROCESSO DE SOLDAGEM MIG/MAG COM VISTAS AO DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA FLEXÍVEL NACIONAL

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Mecânica.
Orientador: Prof. Dr. Jair Carlos Dutra
Coorientador: Prof. Dr. Régis Henrique Gonçalves e Silva

Florianópolis

2017

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

Marques, Cleber
Análise de Técnicas e Efeitos Físicos da Alimentação Dinâmica do Arame no Processo de Soldagem MIG/MAG com Vistas ao Desenvolvimento de um Sistema Flexível Nacional / Cleber Marques ; orientador, Jair Carlos Dutra, coorientador, Régis Henrique Gonçalves e Silva, 2017.
210 p.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Florianópolis, 2017.

Inclui referências.

1. Engenharia Mecânica. 2. Cold Metal Tranfer. 3. MIG/MAG AD. 4. Avanço e recuo do arame. 5. Servomotor CA. I. Dutra, Jair Carlos. II. Silva, Régis Henrique Gonçalves e. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título.

Cleber Marques

ANÁLISE DE TÉCNICAS E EFEITOS FÍSICOS DA ALIMENTAÇÃO DINÂMICA DO ARAME NO PROCESSO DE SOLDAGEM MIG/MAG COM VISTAS AO DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA FLEXÍVEL NACIONAL

Esta Tese foi julgada adequada para obtenção do Título de Doutor em Engenharia Mecânica, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, 19 de maio de 2017.

_____
Prof. Jonny Carlos da Silva., Dr. Eng.
Coordenador do curso

_____
Prof. Jair Carlos Dutra, Dr. Eng.
Orientador

_____
Prof. Régis Henrique Gonçalves e Silva, Dr. Eng.
Coorientador

Banca Examinadora:

_____
Prof. Dr. Américo Scotti

_____
Prof. Dr. Carlos Henrique Ahrens

_____
Dr. Eng. Giovani Dalpiaz

_____
Prof. Dr. Nelso Gauze Bonacorso

_____
Prof. Dr. Walter Antônio Kapp

À minha esposa Elaine,
minha filha Luiza e
aos meus pais João e Aneliza

AGRADECIMENTOS

São sinceros os meus agradecimentos à todas aquelas pessoas que colaboraram em diferentes níveis para a realização deste trabalho, especialmente:

- Ao Prof. Jair Carlos Dutra, pela orientação neste trabalho, por todos os conhecimentos compartilhados e pelo exemplo de dedicação e persistência para com entraves do dia-a-dia que conduziram o LABSOLDA ao seu atual status de desenvolvimento;
- Aos Professores Régis Henrique Gonçalves e Silva e Mateus Barancelli Schwedersky pela orientação nas atividades deste trabalho e nas atividades de gerenciamento do laboratório;
- Ao Dr. Eng Raul Gohr Jr, pelo apoio fundamental na construção do sistema apresentado, e por oferecer condições e contribuir sempre para o desenvolvimento da tecnologia de soldagem nacional;
- Ao apoio fundamental de pessoas que contribuíram diretamente para a realização deste trabalho: Fernando Costenaro, Arthur Gondim Rodrigues, João Facco de Andrade, Marcelo Pompermaier Okuyama, Ramon Natal Meller, Natália Wendt Dreveck, Tiago Calegari, Ricardo Campagnin, Cleber Guedes;
- À todos aqueles que contribuíram no auxílio e gerenciamento das atividades do laboratório: Alberto Bonamigo Viviani, Francisco Sartori, Rafael Costa Barbosa, Hellinton Direne Filho, Márcia Paula Thiel;
- À todos os colegas do LABSOLDA que atuam diariamente para o cumprimento de metas e objetivos do laboratório;
- À Universidade Federal de Santa Catarina e ao Programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica;
- À ANP/PETROBRAS pela concessão de bolsas e pelo fornecimento de recursos para o projeto "*Avanços no processo TIG...*" cadastrado sob o nº 2014/00025-6;
- À FINEP, pelo fornecimento de recursos para o projeto SISASOLDA, convênio n° 01.13.0294-01;
- À minha esposa Elaine e minha filha Luiza, pelo apoio e compreensão na reta final deste trabalho;
- Aos meus pais João e Aneliza, simplesmente por tudo que fizeram e fazem por mim e pela nossa família;
- À toda minha família, pelo apoio incondicional.

“Tenho a impressão de ter sido uma criança
brincando à beira-mar, divertindo-me em
descobrir uma pedrinha mais lisa ou uma concha
mais bonita que as outras, enquanto o imenso
oceano da verdade continua misterioso diante de
meus olhos”.
(Isaac Newton)

RESUMO

Tendo em vista sua aplicabilidade em quase todos os setores industriais, a soldagem assume papel de extrema importância dentro da cadeia produtiva. É com esta visão que países desenvolvidos fazem fortes investimentos de P&D no campo da soldagem, propiciando forte escalada desenvolvimentista neste setor. No Brasil a situação é bastante diferente. Grande parte das aplicações de soldagem são realizadas nos mesmos moldes tecnológicos que aconteciam há 40 anos. Quando uma indústria instala algo de modernidade é quase certo que se trata de uma "caixa preta" importada, sem contribuição para o desenvolvimento de tecnologia nacional.

Inserido neste contexto e seguindo a filosofia adotada pelo LABSOLDA ao longo de sua existência, o presente trabalho analisa as bases científicas de uma versão do processo MIG/MAG vinda ao mercado há cerca de dez anos, atingindo o ponto de criar um modelo próprio a fim de tornar possível uma total independência do equipamento importado para análises mais acuradas. A tecnologia analisada trata da estratégia de avanço e recuo do eletrodo que é utilizada na versão do MIG/MAG conhecida comercialmente como CMT. Essa estratégia de movimentação do arame é denominada neste trabalho de alimentação dinâmica. Apesar da disponibilidade comercial desse equipamento, a análise de efeitos físicos da transferência metálica e da sua consequência para com os resultados da solda acabam sendo limitadas pelas características do modelo comercial. Sendo assim, o presente trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema nacional com total flexibilidade para a configuração de parâmetros e definição de novas estratégias de controle. Inicialmente, as avaliações acerca da alimentação dinâmica de arame aconteceram em concordância com a análise de características construtivas e operativas do CMT, apresentando pontos que contribuíram para o entendimento do princípio de funcionamento desse sistema. Foram investigados os efeitos que as regulagens adimensionais exercem fisicamente sobre o processo. É apresentada uma avaliação das diferenças observadas em curvas sinérgicas, fundamentalmente as inerentes ao aço em comparação com o alumínio. As análises foram consubstanciadas com filmagens de alta velocidade, o que foi fundamental para os resultados alcançados.

Um dos principais desafios para o desenvolvimento do sistema foi a seleção e análise das tecnologias de acionamento. Com um melhor desempenho obtido por servomotores CA, foram definidas as estratégias

para implementação do software de controle do sistema, totalmente integrado à fonte de soldagem desenvolvida pela empresa IMC, spin-off do LABSOLDA. Os ensaios para a avaliação do sistema consistiram em depósitos realizados com arames de aço e alumínio, onde foi possível alcançar uma frequência de transferência de até 90 Hz. Os resultados obtidos mostraram a total capacidade de se realizar soldagens com o novo sistema, constituindo assim uma importante ferramenta para a continuidade da pesquisa e de novos desenvolvimentos correlatos.

Palavras-chave: Cold Metal Transfer, MIG/MAG AD, avanço e recuo de arame, Servomotor CA

ABSTRACT

Given its applicability in almost all metal-mechanics industrial sectors, welding plays an extremely important role in the production chain. It is with this vision that highly developed countries make strong investments in welding R & D, providing strong development in this sector. In Brazil, the situation is somewhat different. Most of the welding applications are carried out in the same technological fashion that have been going on for 40 years. When an industry installs something modern, almost certainly it is an imported "black box", with no contribution to national technology development.

Inserted in this context and following the philosophy adopted by LABSOLDA throughout its existence, the present work analyzes the scientific bases of a MIG / MAG process version that came to the market about ten years ago, reaching the point of creating an own model, making possible the complete independence of imported equipment for more accurate analysis. The analyzed technology deals with the electrode advance and retreat strategy that is used in the MIG / MAG version commercially known as CMT and others. This wire movement strategy is denominated in this work as dynamic feeding. Despite the commercial availability of this equipment, the metal transfer's physical effects analysis and its consequence over weld results are limited by the commercial model characteristics. Thus, the present work focus is on the development of a national system with complete flexibility for parameters configuration and new control strategies definition. Initially, the evaluations of the dynamic feeding happened in agreement with the analysis of the constructive and operative CMT characteristics, presenting points that contributed to the knowledge of this technology's operation principle. The physical effects of the dimensionless parameters over the process were investigated. An evaluation of the observed differences in synergistic curves is presented, mainly those related to steel compared to aluminum. The analyses were carried out with high speed filming, which was fundamental for the results achieved.

One of the main challenges for the system development was the drive technology selection and analysis. With better performance obtained by AC servomotors, the strategies for implementing the system control software were defined, regarding total integration with the welding power source developed by the company IMC, LABSOLDA's first spin-off. The system evaluation tests consisted of deposits made with steel and aluminum wires, enabling transfer frequencies up to 90 Hz. The results

obtained showed the total capability to perform welding with the new system, thus constituting an important tool for research continuity and new related developments.

Keywords: Cold Metal Transfer, GMAW DF, Wire feed and retraction, AC Servomotor

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Comparativo entre depósitos de Alumínio; (a) MIG pulsado - potência 2332 W, (b) MIG convencional - potência 1450 W e (c) MIG CMT– potência 1863 W. Arame ER4043, 1,2 mm e velocidade de soldagem de 10 mm/s (60 cm/min.) 36
Figura 2 – Representação da variação da velocidade de arame no modo Pulsado Térmico, adaptado de [16] 39
Figura 3 - Forças envolvidas na transferência metálica para o processo MIG/MAG, onde F_g - força gravitacional; F_{em} - força eletromagnética, F_γ - força devido à tensão superficial do metal fundido, F_a - força de arraste dos gases e F_v força de vaporização, adaptado de [17] 40
Figura 4 – Oscilogramas de tensão e corrente para soldagem MIG de alumínio, arame ER5183 de 1,2 mm, Va = 7m/min 41
Figura 5 – Representação da relação entre os volumes do cilindro de arame e o volume da esfera ou gota de material transferido 42
Figura 6 – Representação de quadros correspondentes ao avanço do arame durante o curto circuito para a condição apresentada na Figura 4 43
Figura 7 - Relação entre o diâmetro da esfera (ou diâmetro de gota) e o comprimento de arame correspondente ao mesmo volume, para arame de diâmetro 1,2 mm 44
Figura 8 – Representação da atuação entre forças de coesão entre átomos ou moléculas no interior e na superfície de material [23] 45
Figura 9 – Relação entre a medida experimental da tensão superficial do ferro e temperatura da poça para diferentes gases de proteção [22] 47
Figura 10 – Tensão superficial de materiais puros (alumínio e ferro) segundo revisão de Keene [27] 49
Figura 11 – Representação esquemática do aparato usado por Bainbridge e Taylor [28] para a determinação da tensão superficial de alumínio e suas ligas, adaptado de [28] 50
Figura 12 – Formação de fraturas na camada superficial de óxido em gota de alumínio durante ensaio para determinação de tensão superficial [28] 50
Figura 13 – Medidas de tensão superficial apresentadas por Bainbridge e Taylor para alumínio e ligas, na condição “fundido” e “fundido + fratura da superfície”, adaptado de [28] 51
Figura 14 - Evento de transferência de gota com auxílio da tensão superficial, arame de alumínio ER4043, diâmetro 1,2 mm 52

Figura 15 - Movimento de avanço e recuo do arame para o MIG/MAG, adaptado de [34]..... 54
Figura 16 – Tocha de soldagem MIG/MAG CSC [35]..... 55
Figura 17 – Diagrama esquemático do ciclo de corrente para o CSC [36] 55
Figura 18 – MIG/MAG microMIG da SKS; A – Curva característica de corrente; B – Tocha robótica com dispositivo tracionador de arame [38] 57
Figura 19 – Imagem termográfica de face posterior de chapa de alumínio com 6 mm de espessura durante realização de soldagem com duas versões do processo; A – MIG Convencional, potência média instantânea = 1438 W; B – MIG CMT, potência média instantânea = 2126 W..... 62
Figura 20 – Perfil de temperatura na região indicada nos termogramas da Figura 19 63
Figura 21 – Aspecto visual de depósitos de alumínio com MIG convencional e CMT..... 63
Figura 22 – Exemplo de união do tipo solda-brasagem entre alumínio e aço galvanizado realizada com CMT; A – configuração da junta e posição relativa do arame; B – macrografia da região de união [49].... 65
Figura 23 - Resultado comparativo de revestimento com Inconel 625 usando três versões do processo MIG/MAG; A – Pulsado CC; B – Pulsado CA; C – CMT [59] 67
Figura 24 – Comparação de resultados de soldagem de raiz com MIG CMT apresentados nos trabalhos de Kim [61] em (A) e de Sartori [62] em (B). 68
Figura 25 – Resultados de raiz com CMT em soldagem Orbital de tubos de 18” (cada coluna de imagem corresponde à um corpo de prova) [62] 69
Figura 26 - Soldagem de passe de raiz em alumínio naval; a) MIG CMT; b) MIG Convencional 70
Figura 27 – Depósitos multicamadas apresentados por Cong et al. [64] na soldagem com CMT Advanced Pulse e liga de alumínio cobre (AA2319)..... 71
Figura 28 - Disposição de componentes básicos de um sistema CMT. 1 – Fonte de Alimentação; 2 – Cabeçote alimentador; 3 – Buffer de arame; 4 – Tocha, adaptado de [34]..... 72
Figura 29 – Oscilogramas idealizados apresentados pelo fabricante, adaptado de [67]..... 73
Figura 30 – Diagrama esquemático do equipamento CMT [66]..... 74

Figura 31 – Buffer de arame do equipamento CMT (A), com detalhe para posicionamento de alavanca do sensor; B – Excesso de arame ou buffer cheio; C – Falta de arame ou buffer vazio 76
Figura 32– Esquema de movimentação da tocha com variação de altura. A – Variação lenta de altura; B – Variação brusca de altura em 2 Hz e Vs = 50 cm/min [7] 77
Figura 33 – Resposta na velocidade de arame. A – movimento de tecimento em 2 Hz; B – movimento de tecimento em 4 Hz [7] 77
Figura 34 – Diferença nos tempos de curto-circuito em condição de extrema variação na altura da tocha no modo CMT [7] 78
Figura 35 – Resposta da velocidade de arame fornecida pelo cabeçote em função da intervenção manual sobre a alavanca do buffer 79
Figura 36 – Oscilogramas de tensão, corrente e velocidade de arame no cabeçote durante ensaio de avaliação do funcionamento do buffer; A – buffer com alavanca em posição central; B – buffer movida na direção de sobra de arame (buffer cheio) 79
Figura 37 – Sequência de 4 frames no instante de maior comprimento do arco para soldagem CMT com arame de aço inoxidável..... 81
Figura 38 – Metodologia de controle do comprimento do arco para o CMT [69] 82
Figura 39 – Oscilogramas de tensão e corrente para o modo CMT, utilizando o programa sinérgico de alumínio AlSi5, arame ER4043 de 1,2 mm, na regulagem de Va = 6,0 m/min 83
Figura 40 – Oscilogramas de tensão e corrente para o modo CMT Pulse, utilizando o programa sinérgico de alumínio AlSi5, arame ER4043 de 1,2 mm, na regulagem de Va = 6,0 m/min 84
Figura 41 – Oscilogramas de tensão e corrente para o modo CMT Advanced, utilizando o programa sinérgico de alumínio AlSi5, arame ER4043 de 1,2 mm, na regulagem de Va = 6,0 m/min 84
Figura 42 – Oscilogramas de tensão e corrente para o modo CMT Advanced Pulse, utilizando o programa sinérgico de alumínio AlSi5, arame ER4043 de 1,2 mm, na regulagem de Va = 6,0 m/min..... 85
Figura 43 – Gráficos comparativos entre variantes CMT e MIG pulsado [69] 88
Figura 44 – Oscilogramas estilizados de velocidade de arame, corrente e tensão para o modo CMT [67] 92
Figura 45 – Oscilograma de tensão e corrente para o MIG/MAG CMT, programa sinérgico do arame ER 70S-6..... 93
Figura 46 – Exemplo da variação da Va fornecida pelo cabeçote do CMT em função da alteração na DBCP, para uma Va regulada em 5,9 m/min [62]..... 95

Figura 47 – Fontes de Soldagem utilizadas; a) CMT Advanced 4000R; b) IMC Digiplus A7 600 A 97
Figura 48 – Dispositivos manipuladores; a) Robô Motoman UP6; b)Tartílope V2..... 98
Figura 49 – Sistema de aquisição de dados dedicado à soldagem – SAP-4 99
Figura 50 – Motores utilizados em ensaio de movimentação; A – Motor CC; B – Motor de passo; C – Servomotor AC.....102
Figura 51 – Drivers utilizados em ensaio de movimentação; A – Rutex R2010; B – Applied Motion STR8; C – Panasonic Minas A4 series...102
Figura 52 – Conjunto servomotor Kollmorgen Series AKM e servo driver AKD 103
Figura 53 – Representação esquemática de etapas de ensaios e desenvolvimento 104
Figura 54 – Layout da bancada utilizando robô antropomórfico para mover a tocha.....106
Figura 55 – Layout da bancada utilizando um manipulador para deslocar a peça enquanto a tocha permanece fixa 106
Figura 56 - Organização dos componentes básicos e as principais medidas que foram testadas para determinar as melhores condições de filmagem. 107
Figura 57 – Disposição básica dos componentes de filmagem durante monitoramento de transferência metálica em soldagem CMT.....108
Figura 58 – Sequência de medição de ângulo em monitoramento de rolete da tocha CMT; a) ponto extremo de recuo; b) ponto extremo de avanço; c) ângulo correspondente ao avanço de arame 111
Figura 59 – Diagrama básico do sistema de controle para soldagem MIG/MAG AD.....116
Figura 60 – Bancada utilizada nos testes de inversão de rotação dos motores; 118
Figura 61 – Exemplo da medição da variação angular de um servomotor CA com frequência de inversão de sentido de 50 Hz. A - Posição inicial; B - Posição final.....118
Figura 62 – Cabeçote alimentador utilizado para confecção de primeiro protótipo.....119
Figura 63 – Disposição de equipamentos durante realização de ensaio com carga, com detalhe para a região de monitoramento do deslocamento do arame.....119
Figura 64 – Adaptação de cabeçote alimentador de arame para a realização de soldagem MIG/MAG AD 120

Figura 65 - Concepção de segundo protótipo de tocha para sistema de soldagem alimentação dinâmica integrado..... 121
Figura 66 – Definição inicial para forma de onda de corrente e comando de inversão do motor do sistema de alimentação dinâmica..... 122
Figura 67 – Oscilogramas estilizados de Va, I e U para a versão MIG/MAG AD..... 123
Figura 68 – Bancada de ensaios com versão inicial do protótipo; 1-Fonte de soldagem; 2-Cabeçote de alimentação de arame secundário; 3- Manipulador para deslocamento da peça; 4-Protótipo de tocha para alimentação dinâmica de arame 124
Figura 69 – Bancada de ensaios montada com segunda versão do protótipo para soldagem MIG/MAG AD; 1-Fonte de soldagem; 2-Cabeçote de alimentação de arame secundário; 3- Manipulador para deslocamento da tocha; 4-Protótipo de tocha para alimentação dinâmica de arame; 5-Driver de acionamento do motor do protótipo 126
Figura 70 – Detalhe de segunda versão do protótipo de tocha posicionado em manipulador Tartílope para soldagem MIG/MAG AD 126
Figura 71 – Variação das tensões média e eficaz em função da regulagem na correção do arco, na soldagem com arame inoxidável 309LSi, com 1,0 mm de diâmetro 128
Figura 72 – Oscilogramas de tensão e corrente sob diferentes configurações do parâmetro correção do arco..... 129
Figura 73 – Variação do período de transferência e tempos de aproximação e curto-circuito em função da correção do arco..... 130
Figura 74 – Variação das velocidades de avanço e recuo do arame medidas na tocha de acordo com o valor de correção do arco 131
Figura 75 – Instantes de inversão de movimento de avanço e recuo do arame nas diferentes configurações da correção do arco 133
Figura 76 – Variação do máximo comprimento de arco em função da correção de altura de arco no CMT, programa sinérgico de aço inoxidável..... 134
Figura 77 – Alteração da corrente de curto-circuito para diferentes valores de “correção dinâmica”, programa sinérgico para ER70S-6; A) CD = -5; B) CD = 0 e C) CD = +5 136
Figura 78 – Alteração da corrente de curto-circuito para diferentes valores de “correção dinâmica”, programa sinérgico para alumínio; A) CD = -5; B) CD = 0 e C) CD = +5 138
Figura 79 – Oscilogramas de tensão, corrente e velocidade de arame, com destaque para a resposta dinâmica em Va para variações na DBCP.

Soldagem com ER70S-6, 1,2 mm de diâmetro, Va regulada em 4/min e CD = 0.....139
Figura 80 - Oscilogramas de tensão, corrente e velocidade de arame em ensaio com variação de DBCP para regulagem de CD = 0; A – peça aproximando da tocha e; B – peça afastando da tocha.....140
Figura 81 - Imagem obtida pela filmagem em alta velocidade do rolete que traciona o arame na tocha.....141
Figura 82 – Sequência de avanço e recuo do rolete em condições normais de operação 143
Figura 83 – Sequência de avanço e recuo do rolete durante aproximação relativa entre tocha e peça.....144
Figura 84 – Problema na reabertura do arco durante ensaio com CD +5 145
Figura 85 – Problema de adesão do arame à poça durante ensaio com CD +5.....145
Figura 86 – Oscilogramas de tensão e corrente para soldagem com arame de alumínio ER4043 e programa sinérgico de alumínio AlSi5, Va regulada = 5 m/min 147
Figura 87 – Oscilogramas de tensão e corrente para soldagem com arame de alumínio ER4043 e programa sinérgico de aço G3Si adaptado, Va regulada = 5 m/min 148
Figura 88 – Sobreposição de oscilogramas de corrente com e sem pulso na soldagem do alumínio ER4043 149
Figura 89 – Instabilidades ocorridas no momento do curto-circuito em ensaio com pulso de corrente na soldagem de alumínio ER4043, parâmetros correspondentes a Va = 5m/min.....150
Figura 90 – Abertura de arco durante o pulso de corrente do curto-circuito na soldagem com alumínio ER4043, para a regulagem Va = 4 m/min 152
Figura 91 – Frames de filmagem de alta velocidade correspondentes ao oscilograma da Figura 90.....153
Figura 92 – Oscilogramas de tensão e corrente para soldagem com arame de aço ER70S-6 e programa sinérgico de aço G3Si, Va regulada = 5 m/min.....154
Figura 93 – Oscilogramas de tensão e corrente para soldagem com arame de aço ER70S-6 e programa sinérgico de alumínio adaptado...155
Figura 94 – Ciclogramas de tensão x corrente obtidos na soldagem de aço carbono durante 5 eventos de transferência; A – com pulso de corrente no curto; B – sem pulso no curto 156
Figura 95 – Instante de abertura do arco para os ensaios com e sem pulso de corrente no curto circuito.....156

Figura 96 – Estricção da ponte metálica em instante anterior ao retorno do arame no programa sinérgico de aço carbono, com pulso de corrente (arame de aço carbono) 158
Figura 97 – Comportamento da ponte metálica em instante anterior ao retorno do arame no programa sinérgico de alumínio AlSi5, sem pulso de corrente (arame de aço carbono) 158
Figura 98 – Comparativo de formas de onda com e sem pulso de corrente durante o curto-circuito 159
Figura 99 – Oscilogramas de tensão, corrente e velocidade de arame na tocha, programa sinérgico de alumínio AlSi5, arame ER4043 de 1,2mm e Va regulada em 5 m/min 161
Figura 100 – Oscilogramas de tensão, corrente e velocidade de arame na tocha, programa sinérgico de aço G3Si, Arame ER70S-6 de 1,2 mm e Va regulada em 4 m/min (CD = +5) 163
Figura 101 – Comportamento da fusão do arame na formação da gota durante corrente de base (I_sc_wait); A – Soldagem com alumínio ER4043 de 1,2 mm ; B – Arame ER70S-6 de 1,2 mm..... 164
Figura 102 – Fluxograma representativo da definição de etapas durante o procedimento de soldagem..... 168
Figura 103 - Fluxograma correspondente à etapa de abertura do arco 169
Figura 104 - Fluxograma correspondente à etapa de soldagem 171
Figura 105 - Fluxograma correspondente à etapa de finalização 172
Figura 106 – Oscilogramas de tensão e corrente com destaque para a etapa de abertura 174
Figura 107 – Oscilogramas de tensão e corrente com destaque para a etapa de soldagem, em depósito feito com arame de alumínio ER5183 com Ø = 1,2 mm, frequência de transferência aproximadamente 40 Hz. 175
Figura 108 – Oscilogramas de tensão e corrente com destaque para a etapa de finalização 176
Figura 109– Depósito nº1 realizado com arame de alumínio ER5183, com 1,2 mm de diâmetro..... 177
Figura 110– Depósito nº2 realizado com arame de alumínio ER4043, com 1,2 mm de diâmetro..... 177
Figura 111 – Depósito nº3 realizado com arame de aço ER70S-6, com 1,2 mm de diâmetro..... 178
Figura 112 – Oscilogramas de tensão e corrente com destaque para o pulso adicional na etapa de curto, em depósito feito com arame de aço ER70S-6 com Ø = 1,2 mm..... 178
Figura 113 – Sequência da transferência metálica utilizando o protótipo com motor Panasonic na soldagem MIG AD de alumínio ER5183.... 181

Figura 114 - Oscilogramas de tensão e corrente correspondentes à filmagem da Figura 113 182
Figura 115 – Detalhe de evento curto-circuito na soldagem de alumínio ER5183 sem mergulho do arame na poça, Ref Va avanço = 1000 e Ref Va recuo = 750.....183
Figura 116 - Variação no máximo comprimento do arco em 10 eventos de transferência, arame ER5183, Ref Va avanço = 1000 e Ref Va recuo = 750 184
Figura 117 – Relação entre o mergulho do arame na poça, alongamento da ponte metálica e máximo comprimento do arco.....185
Figura 118 - Depósito de aço carbono em chapa de 1 mm correspondente a ensaio Va2 (Tabela 22) 188
Figura 119 - Depósito de aço carbono em chapa de 2 mm correspondente a ensaio Va5 (Tabela 22) 188
Figura 120 - Depósito de aço carbono em chapa de 2 mm correspondente a ensaio Va7 (Tabela 22) 188
Figura 121 – Oscilogramas de tensão e corrente obtidos em ensaio com aço carbono Va5-SP, com destaque para a variação no período.....189
Figura 122 – Oscilogramas de tensão e corrente correspondente ao ensaio Va5.....189
Figura 123 – Exemplo de ruptura da ponte metálica em ensaio Va5-SP (sem pulso de corrente no curto).....190
Figura 124 – Exemplo de ruptura da ponte metálica em ensaio Va5 (com pulso de corrente no curto).....190
Figura 125 – Contato do arame com a poça após pulso de corrente no curto em imagem extraída do vídeo referente ao ensaio Va53 191
Figura 126 – Estratégia de medição de deslocamento de arame no avanço e recuo para estimativa das velocidades médias 192
Figura 127 - Exemplo formação de respingos durante a ruptura da ponte metálica em ensaio Va7-SP (sem pulso de corrente no curto) 193
Figura 128 - Exemplo de ruptura da ponte metálica em ensaio Va7 (com pulso de corrente no curto).....193
Figura 129 – Sequência de transferência metálica em ensaio Va2, arame de aço carbono ER70S-6.....194
Figura 130 – Aspecto superficial de depósitos realizados com arame ER4043 utilizando o protótipo 2 195
Figura 131 - Soldagem em junta de topo de chapa de 1 mm, arame ER4043 1,2 mm, velocidade de soldagem 65 cm/min.....195
Figura 132 – Oscilogramas de tensão e corrente em ensaio com aço carbono, com média de frequência de transferência próxima a 90 Hz.196

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros elétricos medidos em ensaio preliminar comparativo entre MIG convencional e CMT na soldagem de alumínio 61
Tabela 2 – Parâmetros editáveis do modo CMT 92
Tabela 3 – Parâmetros definidos para o sinérgico AlSi5 no modo de "otimização"..... 94
Tabela 4 - Lista de componentes integrantes em sistema de monitoramento por imagens de alta velocidade e aquisição de dados integrado..... 100
Tabela 5 – Definição de parâmetros para ensaios de avaliação do parâmetro correção do arco 110
Tabela 6 - Definição de parâmetros para ensaios de avaliação do parâmetro correção dinâmica 112
Tabela 7 - Parâmetros das curvas sinérgicas de alumínio e aço carbono para a velocidade de arame de 5 m/min 114
Tabela 8 – Descritivo de parâmetros para soldagem MIG/MAG AD. 123
Tabela 9 – Parâmetros regulados em depósitos realizados com primeiro protótipo do sistema MIG/MAG AD 125
Tabela 10 – Valores obtidos com a aquisição de dados na avaliação do parâmetro correção do arco, Va regulada em 5 m/min..... 127
Tabela 11 – Medições correspondentes às velocidades de avanço e recuo de arame em função do parâmetro correção do arco 131
Tabela 12 – Dados de avaliação do parâmetro CD para programa sinérgico de aço..... 135
Tabela 13 – Dados de avaliação para programa sinérgico de alumínio 137
Tabela 14 - Tempos de arco e de curto em ensaios com variação da DBCP 141
Tabela 15 – Resultados de deslocamento e velocidade medidos em ensaio com variação de DBCP 142
Tabela 16 - Valores medidos em ensaios com e sem pulso de corrente durante o curto-circuito e arame de alumínio ER4043..... 148
Tabela 17 - Valores calculados para as configurações com e sem pulso de corrente na soldagem de aço carbono, referentes à Figura 98 160
Tabela 18 – Resultado do teste de inversão com motor a vazio..... 165
Tabela 19 – Resultados do teste de inversão com carga..... 166
Tabela 20 – Parâmetros de referência reguladas para as velocidades de avanço e recuo e resultados da aquisição com SAP 179

Tabela 21 – Estimativa para os valores de Va regulados na fonte durante ensaios com primeiro protótipo apresentados na Tabela 20 179
Tabela 22 – Parâmetros regulados em ensaios de soldagem com protótipo 2 em aço ER70S-6.....187
Tabela 23 – Resultados de aquisição de dados referente à ensaios com aço carbono no protótipo 2.....187
Tabela 24 - Parâmetros regulados em ensaios de soldagem com protótipo 2 em alumínio ER4043.....194

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ARM - Advanced RISC Machine – Arquitetura de processadores
AWP – Active Wire Process
AT – aporte térmico
CAr – correção da altura do arco
CCC – curto-circuito controlado
CMT – Cold Metal Transfer
CD – correção dinâmica
CSC – Controlled Short Circuit
DBCP – Distância entre o Bico de Contato e a Peça
de – diâmetro do eletrodo
dg – diâmetro de gota
F – frequência de transferência
Fg – força gravitacional
Fem – força eletromagnética
$F\gamma$ – força devido à tensão superficial
Fa– força de arraste dos gases
Fv – força de vaporização
h – altura
I – corrente
Ib – corrente de base
Ic – corrente de curto
Iba – corrente de base no arco
Ibc – corrente de base no curto
Iboost – Pulso de corrente durante o arco no CMT
Ief – corrente eficaz
Ii – corrente instantânea
Im – corrente média
Ip – corrente de pulso
Ipa – corrente de pulso no arco
Ipc – corrente de pulso no curto
l – comprimento do arco de uma circunferência
LABSOLDA – Laboratório de Soldagem da UFSC
Lel – comprimento do arame/eletrodo por onde circula a corrente de soldagem entre o bico de contato e o arco elétrico (stick-out)
MIG/MAG – Metal Inert Gas / Metal Active Gas
MIG/MAG AD – Versão MIG/MAG com alimentação dinâmica de arame
P – potência (W)

Q – quantidade de calor
SAP – Sistema de Aquisição Portátil
STT – Surface Tension Transfer
r – raio da circunferência
RMD – Regulated Metal Transfer
T – período
ta – tempo de arco
taa – tempo de atraso no comando de inversão do arame após a abertura do arco
tacc – tempo de atraso na corrente de curto
tai – tempo de atraso na corrente após a abertura do arco
tb – tempo de base
tcc – tempo de curto-circuito
tp – tempo de pulso
T – período de transferência
tboost – tempo do pulso de corrente no arco para o CMT
U – tensão
Ua – tensão de referência para detecção da abertura do arco
Uc – tensão de referência para detecção do curto-circuito
Uef – tensão eficaz
Ui – tensão instantânea
Um – tensão média
UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina
V – volume
Va – velocidade de arame
Va m – velocidade média de arame ou velocidade de arame consumida
Vab – velocidade de arame na base de corrente durante o arco
Vap – velocidade de arame no pulso de corrente durante o arco
Vcil – volume do cilindro
Vea – velocidade efetiva do arame
Vesf – volume da esfera
vm – velocidade média
Vr – velocidade de recuo do arame
Vs – velocidade de soldagem
γ – tensão superficial
γt – tensão superficial na temperatura (t)
γf – tensão superficial no ponto de fusão (tf)
ρ – densidade
τ – período de oscilação da gota
η – rendimento

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 29

1.1. JUSTIFICATIVA, CARÁTER DE INOVAÇÃO E OBJETIVOS 31
1.2. ESTRUTURA DO TEXTO 32

2. FUNDAMENTOS CIENTÍFICO-TECNOLÓGICOS..... 35

2.1. CONSIDERAÇÕES A RESPEITO DA TRANSFERÊNCIA METÁLICA POR CURTO CIRCUITO.....40
2.2. ASPECTOS DA TENSÃO SUPERFICIAL 44
2.3. FUSÃO DO ARAME NA SOLDAGEM MIG/MAG 52
2.4. VERSÕES MIG/MAG COM ATUAÇÃO NO RETORNO DO ARAME 53

3. MIG/MAG CMT 59

3.1. APLICAÇÕES DO CMT 64
3.2. ASPECTOS CONSTRUTIVOS E FUNCIONAMENTO 71
3.3. VERSÕES DO CMT 82
3.4. SOBRE O MODO SINÉRGICO DA FONTE FRONIUS 89

4. EQUIPAMENTOS, MATERIAIS E MÉTODOS 97

4.1. EQUIPAMENTOS 97
4.1.1. Fontes de soldagem 97
4.1.2. Dispositivos manipuladores.....98
4.1.3. Equipamentos de medição e monitoramento 98
4.1.4. Sistema de acionamento 101
4.2. MATERIAIS.....103
4.3. METODOLOGIA DE ENSAIOS E DESENVOLVIMENTOS 104
4.3.1. Metodologia para aquisição de imagens em alta velocidade ..105
4.3.2. Etapa 1 – Avaliações acerca do parâmetro "Correção do arco" no MIG/MAG CMT 109
4.3.3. Etapa 2 – Avaliações acerca do parâmetro "Correção dinâmica" 111
4.3.4. Etapa 3 – Avaliações acerca de características de programas sinérgicos do CMT.....113
4.3.5. Etapa 4 – Desenvolvimento de sistema para soldagem MIG/MAG AD 115
4.3.5.1. Desenvolvimento do protótipo.....115
4.3.5.2. Definição de estratégias de controle e realização de ensaios de soldagem.....121

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES..... 127

5.1. CORREÇÃO DO ARCO (ETAPA 1).....127
5.2. CORREÇÃO DINÂMICA (ETAPA 2) 134

5.2.1. Ensaios com movimentação linear da tocha 134
5.2.2. Ensaios com variação da DBCP.....139
5.3. AVALIAÇÃO DE CARACTERÍSTICAS DE PROGRAMAS SINÉRGICOS DO CMT (ETAPA 3).....146
5.3.1. Soldando alumínio com pulso durante o curto-circuito 146
5.3.2. Soldando aço sem pulso durante o curto-circuito 153
5.3.3. Outras discussões.....160
5.4. DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA PARA SOLDAGEM MIG/MAG AD (ETAPA 4).....165
5.4.1. Avaliação dos sistemas de acionamento 165
5.4.2. Definição de Estratégias de Controle 167
5.4.3. Ensaios de Soldagem.....173
5.4.3.1. Resultados com primeiro protótipo.....173
5.4.3.2. Resultados com segundo protótipo.....185
6. CONCLUSÕES 197
7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 201
8. REFERÊNCIAS 203

1. INTRODUÇÃO

Nas indústrias naval e offshore, o processo de fabricação por soldagem tem parcela significativa da produção, desde a fabricação de cascos de embarcações ou estruturas de plataformas, até o revestimento interno de tubulações que devem resistir ao teor corrosivo do produto de extração dos reservatórios de petróleo. A importância da fabricação por soldagem se estende para muitos outros setores, como o automotivo, cuja produção nacional de veículos supera a marca de cento e cinquenta mil unidades por mês. Apesar disso, não existem no país fábricas de equipamentos modernos de soldagem. No setor automotivo, os processos e procedimentos até atingem um elevado grau de mecanização, com grande número de células robotizadas, mas seus equipamentos e soluções chegam aqui como uma "caixa preta" fechada, de origem internacional. Já em estaleiros da construção naval, por exemplo, a situação é bem diferente. Grande parte dos procedimentos de soldagem é realizada de maneira manual, utilizando equipamentos convencionais com tecnologia defasada. Não há fundamentalmente desenvolvimento nacional e, por isso, a produção nacional segue lenta, com baixo índice de inovação.

Verifica-se, então, que há uma dicotomia estratégica de valores que faz com que as instituições de pesquisa e desenvolvimento também acabam ficando reféns de indústrias estrangeiras fabricantes de equipamentos. Portanto, tudo que for desenvolvido com os mesmos é específico às suas próprias tecnologias.

Para fugir desta situação, o Laboratório de Soldagem da UFSC (LABSOLDA) empreendeu estratégias para o desenvolvimento de equipamentos próprios. Com isso, ao longo de seus mais de 40 anos de sua história, o LABSOLDA vem contribuindo para a mudança desse cenário, desenvolvendo soluções e equipamentos com tecnologias nacionais e buscando sempre a aplicação industrial dos sistemas. Dessa forma, existe a liberdade de manipulação de princípios de controle dos processos, tornando possível a busca da 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.

Atualmente verifica-se que, para cada um dos processos tradicionais de solda, existem inúmeras variações que buscam cobrir situações bem específicas, como é o caso da soldagem de raiz de

tubulações. Essas variações dos processos podem ocorrer em termos de variáveis elétricas, como em versões do MIG/MAG com pulsação de corrente [1,2,3]; em detalhes construtivos de tochas, como em novas versões TIG com alta capacidade de resfriamento do eletrodo [4]; e até mesmo em procedimentos de execução automatizados que combinam a alteração de variáveis elétricas em sincronismo com o deslocamento [5,6]. Pode-se citar também as versões de processos que se utilizam da alteração nos valores de velocidade de alimentação do arame, o que neste trabalho está sendo denominado de movimentação ou alimentação dinâmica. Estão incluídas nesse contexto as versões do processo que realizam o controle do movimento de avanço e recuo do arame. No MIG/MAG, o destaque para esse tipo de controle fica com o CMT (*Cold Metal Transfer*), do fabricante *Fronius*. Essa versão tem por característica a realização da transferência metálica com o curto-circuito de maneira facilitada pela ação de recuo do arame. Desse modo, a transferência ocorre praticamente por efeito da tensão superficial do material fundido, de maneira muito estável e com reduzido nível de respingos. Em recentes trabalhos desenvolvidos no LABSOLDA, a tecnologia CMT foi utilizada com sucesso na soldagem de raiz em chapas de alumínio naval [7]. Para esta aplicação, dentre as versões MIG/MAG exploradas, esta foi a variante que propiciou os melhores resultados.

É dentro do contexto de versões do processo MIG/MAG com alimentação dinâmica de arame que está inserido o presente trabalho. No mercado internacional de equipamentos de soldagem existe uma série deles que utilizam princípios de controle com recuo cíclico da alimentação do arame de adição, sem que existam as devidas explicações físicas para os resultados obtidos em soldagem com os referidos equipamentos. Dessa maneira, assim como foi outrora para o desenvolvimento de fontes de energia para soldagem, o presente trabalho busca apresentar as razões físicas para a utilização dos citados tipos de controle, ao mesmo tempo em que apresenta o desenvolvimento de tecnologias próprias.

1.1. JUSTIFICATIVA, CARÁTER DE INOVAÇÃO E OBJETIVOS

O presente trabalho, embora utilizando uma versão de processo já de uso comercial, tem como objetivo precípuo o entendimento de cunho técnico e científico sobre os reais princípios e razões para a sua utilização. Esta versão de processo, designada comercialmente como "*Cold Metal Transfer*" ou "CMT", sugere aos usuários resultados que, em muitos casos, não correspondem aos reais objetivos da tecnologia. Entretanto, em virtude de que a análise dos princípios físicos ficaria limitada quando esta depende tão somente de um equipamento comercial, o presente trabalho se propõe a desenvolver um equipamento próprio com todas as prerrogativas, tanto para análise do processo, como para a soldagem propriamente dita. Com isso deverá ser criado conhecimento técnico que poderá servir de base para a construção de equipamentos nacionais dentro da mesma filosofia que norteou o LABSOLDA e de onde surgiram as empresas IMC- SOLDAGEM e SPS- SOLDAGEM. Não se trata de um trabalho de réplica em relação aos equipamentos importados, assim como não foi no caso dos equipamentos das empresas citadas. Serão sempre equipamentos com potencial de inovação e adaptados às condições nacionais.

Dessa forma, destaca-se que o caráter de inovação deste trabalho está principalmente representado pelo desenvolvimento de um sistema de soldagem nacional, de arquitetura aberta e totalmente flexível para a configuração de parâmetros, permitindo assim a realização de soldagens com a técnica de alimentação dinâmica do arame e a análise de fenômenos físicos envolvidos com essa versão do processo MIG/MAG.

Para este desenvolvimento, são necessárias ações que conduzam a um sólido conhecimento acadêmico sobre as versões do processo que fazem uso do movimento de avanço e recuo do arame, como é o caso do já citado CMT. Esta é a versão comercial do processo MIG/MAG com alimentação dinâmica mais difundida no mercado, que foi lançada pela empresa FRONIUS a menos de 15 anos. Apesar de hoje serem encontrados trabalhos que mostram o potencial de aplicação do CMT, não existem conhecimentos científicos consolidados a respeito dessa versão do processo e dos fenômenos com ela envolvidos. Poucos desses trabalhos abordam o assunto com o propósito de caracterizar o processo e, geralmente, acabam transmitindo as informações sem a devida análise técnica e científica.

Como forma de contribuir neste cenário e atingir o objetivo global

proposto, o presente trabalho define como primeiro objetivo específico a geração de um conhecimento minucioso a respeito dos princípios de funcionamento do CMT em seus diferentes aspectos, interpretando dados para a compreensão de suas estratégias de controle. Para isso são analisados os efeitos obtidos por diferentes configurações disponíveis no equipamento, a começar pelos parâmetros de correção adimensionais denominados “correção do comprimento do arco” e “correção dinâmica”. Outro ponto de estudo está ligado à compreensão dos fenômenos físicos envolvidos na transferência metálica do CMT e as implicações de utilização de um pulso de corrente durante o curto-circuito em programas sinérgicos, como para o caso do aço carbono.

Em sequência, considerando todo o conhecimento adquirido acerca da alimentação dinâmica para o processo MIG/MAG, foi estabelecido como segundo objetivo o desenvolvimento de um sistema de soldagem capaz de operar com essa técnica. O desenvolvimento deve compreender a criação de uma infraestrutura que permita o estudo e implementação de estratégias de controle para realização de uma soldagem MIG/MAG com alimentação dinâmica, utilizando para isso um dispositivo protótipo próprio. Uma das principais dificuldades está ligada a necessidade de o dispositivo fornecer uma elevada frequência de inversão no movimento do arame, em uma média próxima de 60 Hz, mas podendo requerer valores ainda maiores. Para avaliação de desempenho do sistema desenvolvido serão realizados depósitos com arames de alumínio e aço carbono.

1.2. ESTRUTURA DO TEXTO

O presente trabalho foi estruturado em 8 capítulos, a começar por esta introdução. No capítulo 2 são apresentadas informações extraídas da literatura técnico-científica, de temas considerados fundamentais para as avaliações acerca do processo MIG/MAG com alimentação dinâmica do arame. Neste capítulo são ainda apresentadas as versões comerciais do processo que são encontradas hoje. A versão que atualmente tem maior destaque internacional é o CMT, motivo pelo qual destinou-se o capítulo 3 para essa modalidade. No capítulo 4 são apresentados os principais equipamentos e materiais utilizados no trabalho, assim como a definição das metodologias de ensaios realizados com o CMT e relacionadas com o desenvolvimento do sistema próprio. No capítulo 5 são apresentados os resultados alcançados nos experimentos realizados, com análise e discussões que fundamentam o conhecimento sobre as técnicas

relacionadas a soldagem MIG/MAG AD. O último item deste capítulo trata ainda dos resultados obtidos no desenvolvimento do sistema próprio. O capítulo 6 apresenta as conclusões e no capítulo 7 são colocadas sugestões para trabalhos futuros. Por fim, no capítulo 8 são listadas as referências bibliográficas que foram consultadas durante o trabalho.

2. FUNDAMENTOS CIENTÍFICO-TECNOLÓGICOS

De modo geral, a motivação para o desenvolvimento de novas versões dos processos de soldagem surge de maneira integrada com os avanços tecnológicos e com a constante busca da indústria por melhorias na qualidade e produtividade. E são as particularidades inerentes a cada tipo de peça ou material a ser soldado que determinam as necessidades de desenvolvimento. Sobretudo, o que sempre se almeja é a obtenção de resultados de soldagem isentos de defeitos.

Em aplicações como a soldagem de chapas de alumínio, a necessidade de desenvolvimento surgiu devido às próprias características físicas deste material. O alumínio possui altos valores de condutividade e difusividade térmica, fazendo com que o calor aportado pelo arco seja rapidamente dissipado, acelerando o processo de solidificação da poça. Com isso, o resultado obtido pode acabar sendo um cordão muito convexo, com forte tendência a formação de poros. O surgimento do modo pulsado contribuiu para o aumento no aporte de calor à peça, em uma faixa de velocidade de arame que na versão convencional corresponderia a uma transferência por curto-circuito. Para essa aplicação, observa-se que a introdução de uma nova versão do processo de soldagem MIG permitiu que fosse alterada a relação entre a potência de soldagem fornecida pelo processo e a quantidade de arame depositado, corroborando em melhorias no resultado. A possibilidade de alteração nesta relação entre a potência e a velocidade de arame foi então alcançada com o desenvolvimento de novas versões do processo. Um exemplo dos efeitos dessa alteração é apresentado no trabalho de Savi [8] quando cita uma comparação realizada em corpos de prova de alumínio com a mesma corrente média, utilizando o MIG convencional e o MIG Pulsado. Em uma posterior reprodução deste ensaio pela equipe do LABSOLDA, foram realizados três depósitos em alumínio, utilizando as versões do processo MIG Pulsado, Convencional e CMT (*Cold Metal Tranfer*). A metodologia consistiu em se manter uma mesma configuração do ensaio para as três versões, sendo inclusive realizado com uma mesma fonte de soldagem. A velocidade de arame foi regulada em 5 m/min, e o resultado de medição mostrou os valores de 5 m/min para o Pulsado; 4,9 m/min para o convencional e 4,8 m/min para o CMT. Os valores de corrente média medidos apresentaram uma variação próxima de 12%, sendo 103 A para o Pulsado e 92 A para o convencional e para o CMT. Apesar disto, a potência fornecida pela fonte foi bastante diferente nos três casos. O resultado dos depósitos é apresentado na Figura 1. Com apenas uma

inspeção visual nos depósitos e macrografias fica evidente as diferenças obtidas com as três versões do processo. O modo pulsado foi aquele que forneceu a maior potência (2332 W) e também a versão que resultou em maior molhabilidade no depósito. O modo convencional foi a versão que resultou em mais baixa molhabilidade, inclusive retratando o surgimento de porosidade. A potência medida para essa modalidade foi de 1450 W. Por fim, o ensaio com a versão CMT configurou uma condição intermediária, seja com relação à geometria do cordão, seja com relação à potência, medida em 1863 W. O resultado apresentado com esse ensaio mostra que a intervenção no modo de controle do processo oferece condições para que seja alterada a relação entre a potência de soldagem aplicada e a quantidade de arame que está sendo depositada. Com isso, as características geométricas do depósito também sofrem alteração, justificando assim o desenvolvimento de variações da versão convencional do processo, viabilizando a realização de soldagens nas mais variadas configurações de juntas, posições de soldagem e materiais de adição.

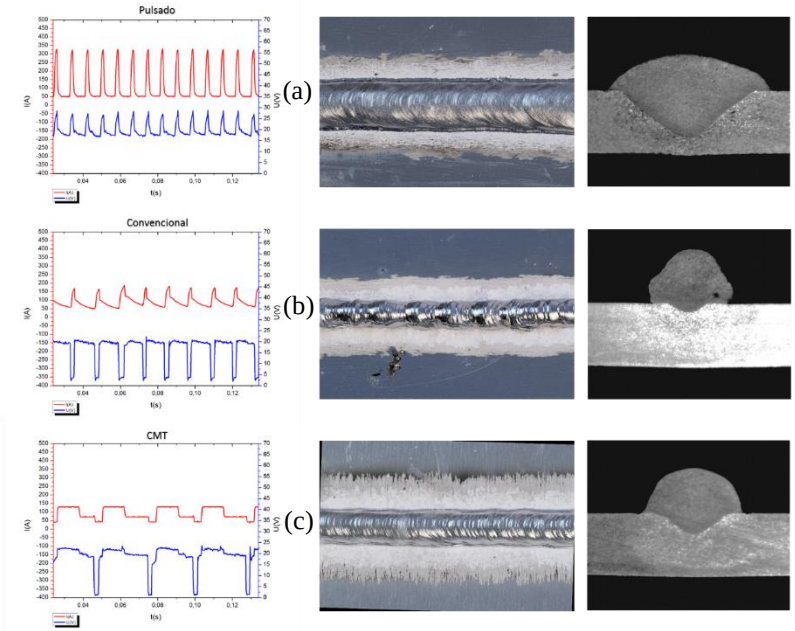


Figura 1 - Comparativo entre depósitos de Alumínio; (a) MIG pulsado - potência 2332 W, (b) MIG convencional - potência 1450 W e (c) MIG CMT– potência 1863 W. Arame ER4043, 1,2 mm e velocidade de soldagem de 10 mm/s (60 cm/min.)

Em outras aplicações, como o caso da soldagem de passes de raiz, a utilização de um modo de transferência por curto-circuito configura a opção que apresenta os melhores resultados. Em fontes de soldagem convencionais, onde o que se tem é um comando da tensão, a transferência metálica por curto-circuito acontece em função de eventos que estão naturalmente associados ao processo. Nesses casos, a corrente de soldagem está livre para variar e reage diretamente aos momentos que ocorrem o contato do arame com a poça metálica [9]. Em consequência desses fatores e características do processo, os valores obtidos em termos de corrente média durante a realização da soldagem são bastante condicionados à manutenção da distância entre o bico de contato e a peça, que por sua vez depende da habilidade do soldador. O modo curto-circuito convencional também está sujeito à grandes índices de geração de respingos e fumos.

O desenvolvimento de versões do processo MIG/MAG com controle de corrente tem como principal justificativa o fato da corrente ser o parâmetro de maior influência para o resultado da solda. Entretanto, controlar a corrente de soldagem em uma condição de transferência por curto-circuito exige que o equipamento seja dotado de estratégias para uma adequada manutenção e estabilidade do arco elétrico. As versões do processo que atuam exclusivamente no controle da corrente para essa finalidade (STT, CCC, RMD, entre outras), utilizam-se de uma forma de onda específica que promove uma estricção da ponte metálica sob a ação direta das forças eletromagnéticas relacionadas com o efeito pinch [10]. Em função dos parâmetros elétricos de momento, o controle reduz a corrente de curto em antecipação ao instante de abertura do arco. Isso contribui, principalmente, para a redução de respingos e fumos. Todavia, a previsão da abertura do arco pode não acontecer de maneira adequada e, nesse caso, o processo estará sujeito a alguma instabilidade. Além disso, para materiais como o alumínio, que possui baixo valor de resistividade elétrica, essa dificuldade é ainda mais acentuada, inviabilizando o uso desse tipo de controle.

Outras filosofias utilizadas para facilitar a transferência de material adotam o recurso de puxar o arame de volta. Dessa maneira, o instante que o arco deverá reabrir está fortemente ligado ao movimento de recuo do arame, que é comandado pela própria fonte. A previsibilidade da abertura do arco independe da leitura de parâmetros elétricos e o processo está apto para operar com diferentes materiais. A dificuldade aqui associada está intimamente ligada com o sistema de acionamento responsável pelo controle do movimento do arame, tendo em vista os altos valores de frequência de inversão que este é requerido. Em sistemas

comerciais que utilizam essa técnica, como o caso do modo CMT citado anteriormente, é notório que os resultados obtidos em termos de estabilidade de processo, geração de respingos e fumos são muito bons. O fato é que, adicionando-se um movimento desse tipo ao arame, toda a poça metálica e o material em deposição são submetidos a uma condição dinâmica diferente da convencional, e esse comportamento ainda carece de estudos mais aprofundados no que diz respeito aos resultados de soldagem que são obtidos.

Abordando o assunto sob a ótica da atuação na movimentação dinâmica do arame, cabe ressaltar que algumas versões dos processos convencionais que adotam de alguma forma a atuação sobre a movimentação do arame, vêm apresentando resultados diferenciados. Isso é atualmente observado tanto para variantes do MIG/MAG como também para o TIG, representado por versões como o TIP TIG [11], Dabber TIG [12,13] e o tigSpeed [14]. A abordagem do assunto sobre essa temática abre perspectivas para um vasto campo exploratório. Ao longo de sua história, o LABSOLDA também teve contribuições neste tema, com o desenvolvimento da versão MIG/MAG com corrente Pulsada e Pulsação térmica ou, simplesmente, Pulsado Térmico. Neste caso, a atuação no arame não tinha por objetivo facilitar a transferência metálica, nem tampouco se realizava o movimento de recuo em altas frequências. O objetivo era simplesmente viabilizar a operação de uma versão do processo que também teve como consequência a alteração no comportamento dinâmico da poça. O trabalho que representa esse desenvolvimento deu origem a primeira patente da UFSC [15], e o seu objetivo primário era promover uma solução para a soldagem de revestimento em pás de usinas termelétricas degradadas pelo fenômeno da cavitação. A proposta substituía o eletrodo revestido pelo processo MIG/MAG, utilizando materiais de adição de maior resistência à cavitação. Pela versão convencional do MIG/MAG, a soldagem desses materiais se mostrou bastante problemática, com aspecto visual ruim, falta de fusão e muita porosidade. Pela versão pulsada ainda remanescia grande quantidade de porosidades. A filosofia desenvolvida com o Pulsado Térmico aplicava o material de adição utilizando-se de dois níveis de energia (duas correntes médias para duas velocidades de arame) (Figura 2). A agitação da poça provocada pela alternância dos níveis de energia foi suficiente para expurgar os gases da poça de fusão e eliminar a formação da porosidade. A alteração cíclica da velocidade do arame se fez necessária para que houvesse manutenção na estabilidade do comprimento do arco, uma vez que a corrente média regulada se alternava entre dois patamares, os denominados tempos de base e pulso térmico.

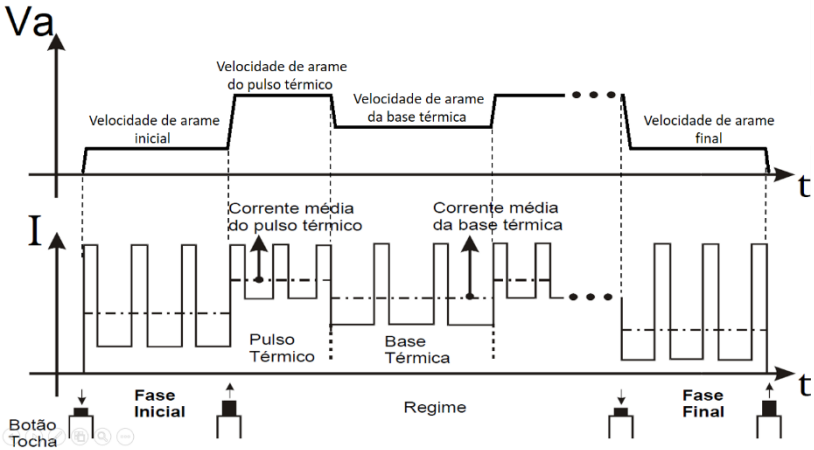


Figura 2 – Representação da variação da velocidade de arame no modo Pulsado Térmico, adaptado de [16]

A movimentação da poça, alterada pela imposição de dois níveis de corrente e velocidade de arame propiciou resultados diferenciados na aplicação citada para o Pulsado Térmico. Da mesma forma, a adoção de uma movimentação dinâmica do arame, em contato direto com a poça durante a transferência por curto-circuito também acaba de alguma maneira interferindo no perfil de movimentação do material fundido. O entendimento sobre as reais influências dessa movimentação sobre o resultado da solda exige um profundo conhecimento das características físicas do processo. O presente trabalho apresenta como fundamentos, uma análise sobre as características da versão CMT, e aspectos de outras versões comerciais que atualmente utilizam a alimentação dinâmica no MIG/MAG. Antes disso, considera-se necessária a realização de uma breve revisão de conceitos correlatos com a física dos eventos relacionados com a transferência metálica.

2.1. CONSIDERAÇÕES A RESPEITO DA TRANSFERÊNCIA METÁLICA POR CURTO CIRCUITO

Duas principais teorias são citadas na caracterização do mecanismo de transferência metálica para o MIG/MAG, a teoria do Equilíbrio Estático de Forças e a chamada "Instabilidade Pinch". A primeira é a mais difundida entre os pesquisadores, com um maior número de informações teóricas e práticas. A segunda, quando se trata de uma avaliação em correntes acima do valor de transição, tem sido hoje bastante aceita [17]. Neste trabalho não se pretende realizar uma vasta revisão bibliográfica sobre esse assunto, já discutido em diversos trabalhos anteriores [17,18,19]. De qualquer forma, alguns pontos principais merecem aqui ser relembrados.

A cada período, a gota de metal fundido formada na ponta do arame está sujeita a diversas forças que colaboram, ou não, para a conclusão da sua transferência para o metal de base. Entretanto, como a análise da física envolvida com o arco elétrico é de fato uma tarefa bastante complexa, existem diferentes avaliações de pesquisadores quanto ao número total das forças que estão envolvidas na transferência.

De modo geral, são apresentadas como sendo as principais forças: a força gravitacional (F_g), força eletromagnética (F_{em}), força devido à tensão superficial do metal fundido (F_γ), força de arraste dos gases (F_a) e força de vaporização (F_v). Dessas, a força eletromagnética e a força devido a tensão superficial são indicadas como as que tem maior influência durante a transferência.

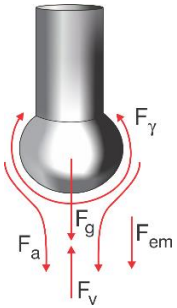


Figura 3 - Forças envolvidas na transferência metálica para o processo MIG/MAG, onde F_g - força gravitacional; F_{em} - força eletromagnética, F_γ - força devido à tensão superficial do metal fundido, F_a - força de arraste dos gases e F_v força de vaporização, adaptado de [17]

Em um modo convencional de operação, o arame está sendo continuamente alimentado para frente, em direção à poça de material fundido. Quando se trata de uma transferência metálica por curto-circuito, é condição, para que seja possível de se realizar a solda, que o evento de transferência se conclua em um tempo pequeno o suficiente para que a parte ainda sólida do arame não alcance o nível da chapa que está sendo soldada. Do contrário, a ponte metálica não será desfeita, o arco não será reaberto, e o arame terá a tendência de ficar aderido à peça. E nesse ponto, pode-se dizer que a natureza física do processo colabora para a continuidade do processo de soldagem. A Figura 4 corresponde a uma soldagem com transferência por curto-circuito. Em uma rápida avaliação para o caso, observa-se que o tempo necessário para que o curto-circuito seja desfeito é menor que 4 ms. Considerando uma velocidade de arame regulada em 7 m/min, o deslocamento de arame calculado nesse tempo corresponde a 0,47 mm em direção à peça.

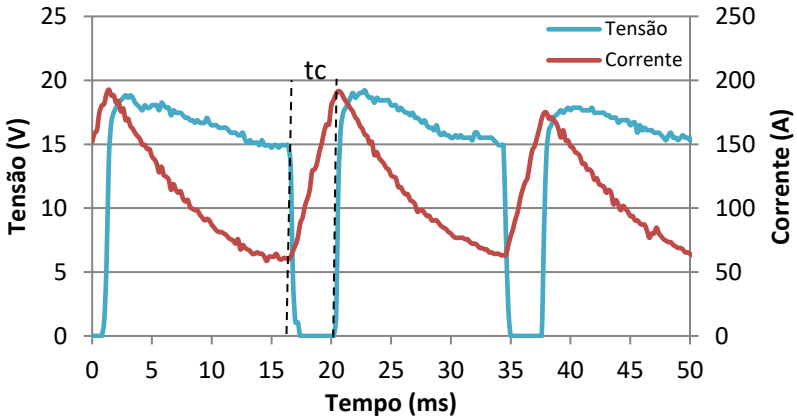


Figura 4 – Oscilogramas de tensão e corrente para soldagem MIG de alumínio, arame ER5183 de 1,2 mm, Va = 7m/min

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 a 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 5.

.

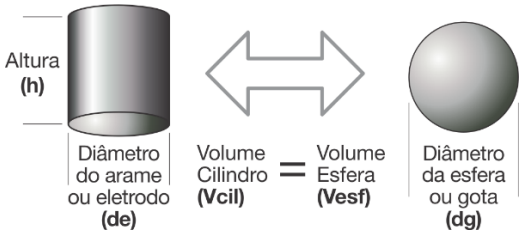


Figura 5 – Representação da relação entre os volumes do cilindro de arame e o volume da esfera ou gota de material transferido

Devido ao evento de destacamento de gotas, em uma transferência metálica por voo livre essa afirmativa é de mais fácil correlação. Entretanto, mesmo para uma transferência por curto-circuito, considera-se que, apesar de não ter se destacado uma gota em formato esférico, o volume de material depositado está relacionado com o volume do cilindro consumido e, teoricamente, é possível se determinar uma gota correspondente a esse volume.

Igualando-se as equações do volume do cilindro (Vcil) e da esfera (Vesf), é obtida, em primeira instância, a equação 1. Como o diâmetro do eletrodo (de) é um parâmetro conhecido e fixo, o diâmetro de gota (dg) está aqui diretamente relacionado com a altura (h) do cilindro consumido.

$$Vcil = Vesf$$

$$h.\pi.\frac{de^2}{4} = \pi.\frac{dg^3}{6}$$

$$d_g = \sqrt[3]{\frac{3.de^2.h}{2}} \qquad (1)$$

A variação da altura do cilindro de arame consumido pode ser determinada pela velocidade de alimentação de arame (Va) regulada e pelo período de transferência (T), conforme equação 2.

$$h = Va.T \qquad (2)$$

Substituindo a equação 2 em 1 e adequando as unidades para as usualmente aplicadas em soldagem, obtém-se a equação 3, que descreve o diâmetro de gota em função da Va e do período de transferência.

$$dg = \sqrt[3]{\frac{T.Va.de^2}{40}} \quad (3)$$

onde:
dg = diâmetro de gota (mm);
T = Período de transferência (ms);
Va = Velocidade de arame (m/min);
de = diâmetro do arame/eletrodo (mm).

Retornando para o oscilograma apresentado na Figura 4, cujo período de transferência é medido em 19 ms, calcula-se um diâmetro de gota teórico de 1,69 mm. O tempo de curto-circuito citado neste exemplo foi de 4 ms, sendo esse o tempo que a gota de material fundido consumiu para ser transferida do arame à peça. Com os dados apresentados, é possível inferir que mesmo com um avanço de 0,47 mm do arame em direção à peça durante o tempo de curto circuito, o processo tem condições de se restabelecer com o rompimento da ponte metálica e reignição do arco elétrico. A Figura 6 representa, de maneira simplificada, o avanço do arame correspondente ao tempo de curto circuito.

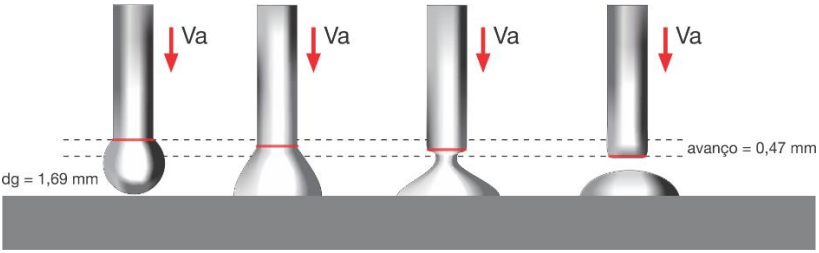


Figura 6 – Representação de quadros correspondentes ao avanço do arame durante o curto circuito para a condição apresentada na Figura 4

Apesar do arame ser alimentado com uma velocidade de avanço fixa, o comportamento da fusão em sua extremidade e o crescimento da gota tem influência na real velocidade de aproximação do arame à poça de fusão. Isso porque à medida que o arame se funde, o material se acomoda na formação da gota, extrapolando os limites definidos pelo diâmetro do arame e se distribuindo mais para os lados. Do ponto de vista da poça de fusão, o efeito é de desaceleração do arame, com uma redução da velocidade efetiva de arame (Vea).

Uma análise também pode ser feita com base na equação 1 apresentada anteriormente. Traçando uma curva que relaciona o crescimento da gota em função do comprimento do arame consumido, ou altura (h) do cilindro, é possível constatar na Figura 7 que a taxa de crescimento do diâmetro da gota é menor que o comprimento do arame consumido. Isso faz com que no início de formação da gota o seu diâmetro seja maior do que o comprimento de arame correspondente ao mesmo volume e, à medida que a gota cresce, a diferença vai reduzindo, passando pelo ponto comum identificado na figura, e chegando a situação onde o comprimento de arame passa a ser maior do o diâmetro da gota formada.

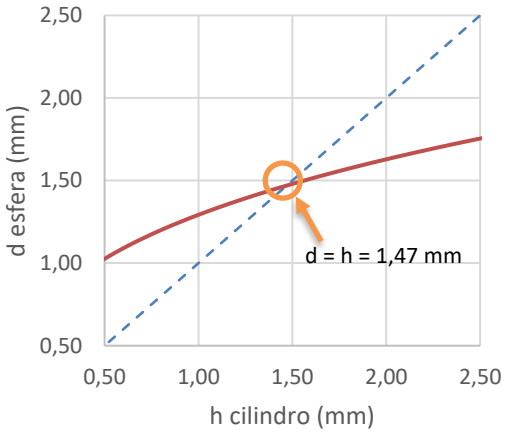


Figura 7 - Relação entre o diâmetro da esfera (ou diâmetro de gota) e o comprimento de arame correspondente ao mesmo volume, para arame de diâmetro 1,2 mm

2.2. ASPECTOS DA TENSÃO SUPERFICIAL

Uma das dificuldades associadas com a soldagem a arco está na necessidade de lidar, a todo instante, com uma porção líquida de material que está sujeita a diversas forças, entre elas a gravidade. Quando a soldagem é realizada fora da posição plana, a situação é ainda mais delicada. E é por se tratar de um material em estado líquido que, na soldagem a arco, a tensão superficial tem um papel de extrema importância, o que é incontestável para diversos autores [20,21,22]. Por ser uma característica fundamental desse estado físico da matéria, a tensão

superficial é fator determinante em diversos aspectos da soldagem, como o efeito de formação de gotas, a influência no fluxo de material fundido da poça, na sustentação de um depósito feito em uma soldagem do passe de raiz, ou na própria formação do cordão e definição de sua geometria [22].

Em meio a tantos eventos influenciados pela existência da tensão superficial que, ao longo do tempo, muitos pesquisadores têm estudado esse fenômeno. Como forma de defini-lo, Baixo [18] em concordância com Matsunawa e Ohji [21] cita que na região de interface entre duas fases ou meios diferentes existe uma fina camada, com poucos átomos, que apresenta uma energia superficial livre maior do que aquelas que estão no interior, devido ao rearranjo nas ligações atômicas. Sobre outra ótica pode-se dizer que, no interior do líquido, os átomos ou moléculas são mutuamente atraídos em todas as direções, buscando sempre uma situação de equilíbrio, enquanto que na superfície, as forças de coesão geram uma resultante para dentro (Figura 8). Esse desbalanceamento das forças entre o interior e a superfície do líquido é denominado de tensão superficial. Se por um lado o interior do material se encontra em equilíbrio, a superfície é sempre uma região com maior energia (energia livre de superfície).

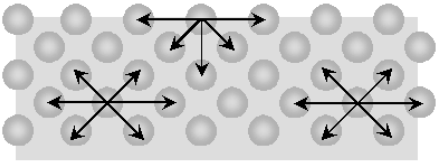


Figura 8 – Representação da atuação entre forças de coesão entre átomos ou moléculas no interior e na superfície de material [23]

Perturbações na superfície do líquido que promovam o seu movimento fazem com que um maior número de moléculas atinja a superfície e, dessa forma, fiquem sujeitas as forças de atração para o interior. A tendência natural é de se atingir, progressivamente um equilíbrio, reduzindo assim o número de moléculas da superfície. Isso explica a forma esférica de gotas de líquidos, sendo esta a situação onde se tem a menor relação área/volume [24].

As gotas de material fundido formadas na extremidade do arame em uma soldagem MIG/MAG seguem esta tendência. Durante sua formação, a resultante de atração voltada para o interior do líquido faz com que a gota permaneça retida ao arame. A força necessária para que a gota permaneça retida cresce à medida que o volume da gota aumenta.

Scotti e Ponomarev [17] apresentam a equação 4 que determina o valor desta que é chamada de força devido a tensão superficial (F_γ). O desprendimento da gota ocorre em função de forças opostas como, por exemplo, a ação da gravidade.

$$F_\gamma = \pi . d_g . \gamma \quad (4)$$

Onde:
F_γ = Força devido à tensão superficial (N);
d_g = diâmetro da gota;
γ = tensão superficial (N/m);

Numericamente, a energia livre de superfície e a tensão superficial se igualam e suas unidades no SI são dadas em J/m² ou N/m [17]. Em termos de magnitude, a tensão superficial (γ) de um material pode ter alterações e sofre influência, principalmente, da temperatura. Além disso, a presença de alguns elementos químicos chamados de tensoativos, como por exemplo o enxofre ou o oxigênio, pode também modificar o seu valor [18]. E quando se trata de soldagem, a própria composição do gás utilizado na proteção gasosa é capaz de promover mudanças na tensão superficial. Por esse motivo, definir o valor de tensão superficial de um material não é uma tarefa simples.

Muitos trabalhos são encontrados na literatura com diferentes técnicas e experimentos relacionados a medição da tensão superficial. Em 1879, Rayleigh [25], avaliando o resultado de ensaios anteriores que mostravam a variação periódica no formato de gotas de água (oscilação), determinou a tensão superficial pela equação 5 abaixo. Neste método, considera-se que a tensão superficial é a única força responsável pela restauração do equilíbrio da gota na forma de uma esfera.

$$\gamma = \frac{3.\pi.\rho.V}{8.\tau^2} \quad (5)$$

onde:
γ = tensão superficial;
ρ = densidade;
V = Volume;
τ = período de oscilação da gota.

Com base nesta equação, Subramaniam et al [26] utilizam-se do processo MIG na versão Pulsada para determinar a magnitude da tensão

superficial de um arame de alumínio 4047. A metodologia consiste na filmagem em alta velocidade de gotas metálicas em trânsito com a técnica de *shadowgrafia* a laser, com o objetivo de monitorar e medir o tempo de oscilação das gotas (como esferoides em um modo prolato-oblato). A opção pelo MIG Pulsado é justificada pelo autor devido à maior controlabilidade na dimensão e velocidade das gotas do que no MIG convencional com transferência por voo livre. Quanto maior diâmetro da gota, mais complexo se torna o seu comportamento vibracional, por isso, a preferência é por gotas pequenas. Com relação à velocidade, o autor cita que altas correntes produzem uma maior aceleração da gota, diminuindo o seu tempo de deslocamento e reduzindo a quantidade possível de medições por evento de destacamento. Quanto maior o número ciclos de oscilação observado, maior a precisão da medição. Uma dificuldade relacionada com esse método está na determinação da temperatura da gota, já que o valor medido de tensão superficial está intimamente ligado a isto. Os resultados apresentados ficaram entre 540 a 700 mN/m (10^{-3} [N/m]).

Utilizando agora um método baseado na medição da frequência de oscilação da poça de material fundido criada por uma tocha TIG, Xiao e Ouden [22] determinaram experimentalmente a tensão superficial de uma liga de aço carbono. Foram avaliados três diferentes gases de proteção nos ensaios. No resultado, apresentado na Figura 9, é possível verificar que a adição de oxigênio no gás reduz significativamente o valor da tensão superficial para uma mesma temperatura. Todavia, diferentemente do argônio e do hélio, os resultados para o oxigênio mostram uma tendência de aumento da tensão superficial com a temperatura.

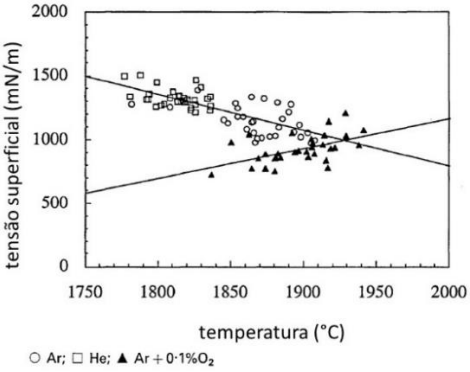


Figura 9 – Relação entre a medida experimental da tensão superficial do ferro e temperatura da poça para diferentes gases de proteção [22]

Em uma ampla revisão de dados publicados por outros pesquisadores, Keene [27] compila informações a respeito da magnitude de tensão superficial de materiais puros. Os resultados são apresentados de forma gráfica, seguindo a equação 6, que acaba linearizando o valor de tensão superficial em função da temperatura. Segundo Keene, a maioria dos autores aplica a melhor relação linear entre os dados experimentais na demonstração dos seus resultados, o que pode ser uma fonte de erros. Citando os dados de Xiao e Ouden [22] para ferro, Baixo [18] mostra que em temperaturas próximas ao ponto de fusão (1530ºC), a relação (d_γ/d_t) é de 0,5 $mN.m^{-1}.ºC^{-1}$, enquanto que em temperaturas próximas a 1850ºC, o valor de d_γ/d_t aumenta para 2,8 $mN.m^{-1}.ºC^{-1}$, comprovando casos onde não existe uma linearidade nos resultados experimentais.

$$\gamma_t = \gamma_f + (\frac{d_\gamma}{d_t})(t - t_f) \qquad (6)$$

onde:
γ_t = tensão superficial na temperatura (t);
γ_f = tensão superficial no ponto de fusão (t_f)

Como forma de se comparar os valores de tensão superficial para ferro e alumínio, os dados apresentados por Keene foram plotados sobre a mesma escala, na Figura 10. A região tracejada projeta, com a mesma equação, os valores de tensão superficial para o alumínio puro em uma mesa faixa de temperatura do ferro em estado líquido. Na temperatura de 1530 ºC, a projeção para o alumínio mostra uma tensão superficial de 736 mN/m, enquanto o ferro teria o valor de 1862 mN/m.

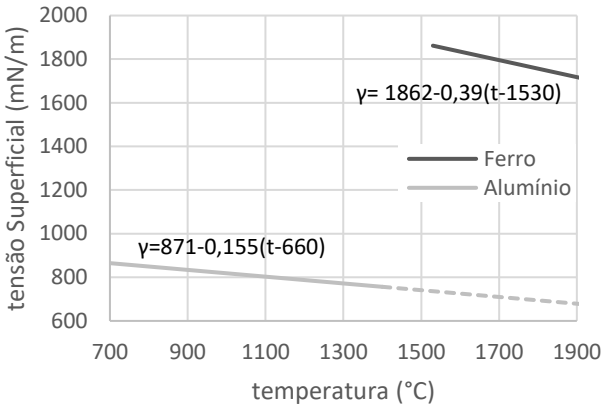


Figura 10 – Tensão superficial de materiais puros (alumínio e ferro) segundo revisão de Keene [27]

Os valores apresentados por Subramaniam et al [26], Xiao e Ouden [22] e Keene [27] apesar de, em alguma faixa, estarem bastante próximos, confirmam a dificuldade em se determinar a magnitude da tensão superficial e as variações obtidas nas medições em função, por exemplo, da adição de elementos de liga, ou de gases atuando na superfície do metal fundido. Por esse motivo, inúmeras publicações e revisões encontradas na literatura apresentam informações, em sua maioria, relacionadas com a determinação de tensão superficial para metais puros. Sob essa justificativa, Bainbridge e Taylor [28] realizaram um trabalho para determinação da tensão superficial de alumínio e suas ligas, em diferentes atmosferas. Como técnica experimental, os autores utilizaram o aparato demonstrado esquematicamente na Figura 11. A amostra, colocada em um forno para atingir a temperatura de ensaio (determinada em t_f + 50 ºC), era submetida a ação mecânica de uma sonda (probe), que causava a fratura da superfície da gota. A característica diferencial do trabalho está exatamente na comparação de resultados medidos antes e depois da fratura na camada superficial de óxido formada na gota de alumínio, como mostra a Figura 12.

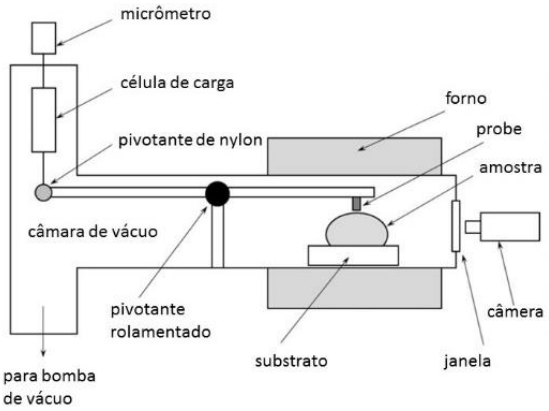


Figura 11 – Representação esquemática do aparato usado por Bainbridge e Taylor [28] para a determinação da tensão superficial de alumínio e suas ligas, adaptado de [28]

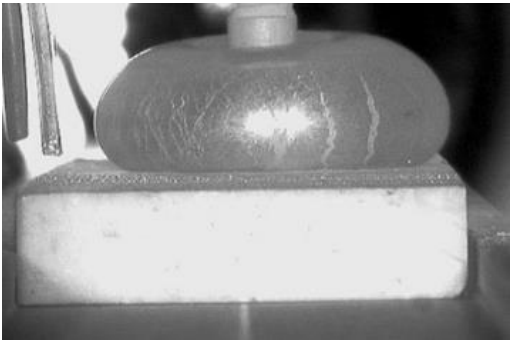


Figura 12 – Formação de fraturas na camada superficial de óxido em gota de alumínio durante ensaio para determinação de tensão superficial [28]

Os resultados apresentados por Bainbridge e Taylor (Figura 13) mostram que, na grande maioria dos casos, a tensão superficial medida antes da ruptura da camada de óxido foi maior. A exceção ficou com a amostra da liga 7075, cuja tensão superficial aumentou com a fratura da superfície. Considerando a ampla faixa de ensaios, os valores medidos para alumínio e ligas variaram entre 1073 mN/m a 336 mN/m, com maioria registrada entre 870 mN/m e 500 mN/m.

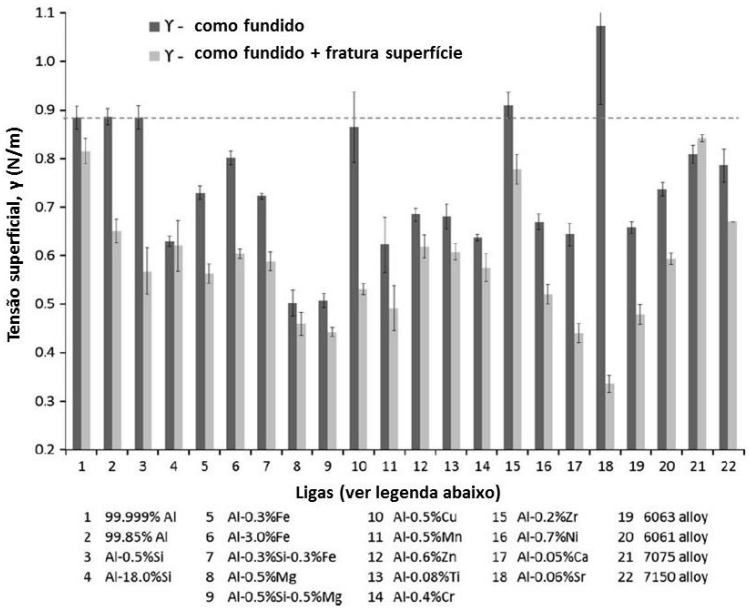


Figura 13 – Medidas de tensão superficial apresentadas por Bainbridge e Taylor para alumínio e ligas, na condição “fundido” e “fundido + fratura da superfície”, adaptado de [28]

Em procedimentos de soldagem que a transferência metálica acontece por meio do curto-circuito, a tensão superficial que durante a formação da gota atua no sentido de reter a gota no arame, passa a auxiliar no evento de transferência. A Figura 14 ilustra, com frames de uma filmagem em alta velocidade, o comportamento do metal fundido da gota no momento do curto-circuito com a peça, sua acomodação e transferência para a poça.

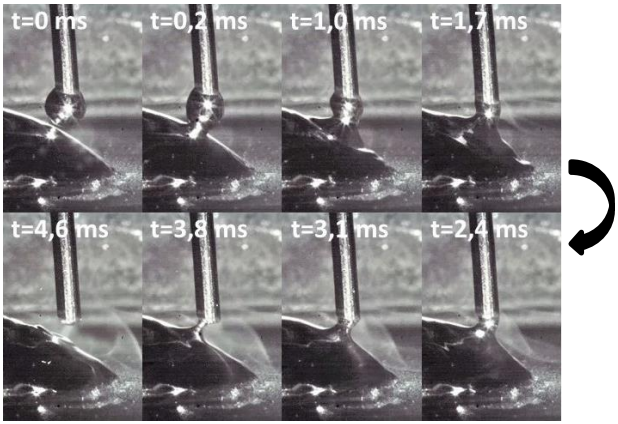


Figura 14 - Evento de transferência de gota com auxílio da tensão superficial, arame de alumínio ER4043, diâmetro 1,2 mm

2.3. FUSÃO DO ARAME NA SOLDAGEM MIG/MAG

Uma das premissas para a obtenção da estabilidade em um processo de soldagem é manter o equilíbrio entre a velocidade de alimentação do arame e a sua velocidade de fusão. Em processos convencionais, onde se tem na fonte o comando da tensão, isso não se torna crítico devido ao que é chamado de autocontrole ou controle interno [29]. Em versões com controle de corrente, como o modo pulsado, determinar a relação entre a velocidade de alimentação e fusão é imprescindível para a manutenção do comprimento do arco e da estabilidade do processo.

Durante a soldagem, o aquecimento responsável pela fusão do arame é proveniente de duas fontes principais, o calor fornecido pelo arco na região de acoplamento anódico (ou catódico, dependendo da polaridade) e o calor gerado por efeito Joule devido a passagem de corrente pela extensão sólida do arame entre o bico de contato e a frente de fusão [17,18]. Essa é a interpretação dada para a equação de consumo de arame proposta por Lesnewich em 1958 [30], que tem sido até hoje utilizada por diversos pesquisadores. Em uma versão simplificada apresentada na equação 7, verificam-se duas parcelas que são associadas às fontes de calor citadas anteriormente. A parcela (αI_m) está associada ao aquecimento provindo do arco, enquanto que a parcela ($\beta L_{el} I_{ef}$) se refere ao aquecimento por efeito joule [18,29].

$$Va = \alpha I_m + \beta L_{el} I_{ef} \quad (7)$$

Quando se trata de uma soldagem com transferência metálica por curto-circuito, observa-se uma alternância cíclica entre os estados de arco aberto e curto-circuito. Como abordado por Scotti e Ponomarev, na fase de arco a fusão do arame é influenciada pelo aquecimento proveniente do arco e do efeito Joule, mas na fase de curto, o que se tem é apenas a parcela correspondente ao efeito joule. Por esse motivo, quando a transferência é por curto-circuito, a equação de consumo está melhor caracterizada pela equação 8 abaixo.

$$Va = \alpha I_m + \beta L_{el} I_{ef} \Big|_0^{t_a} \quad + \quad Va = \beta L_{el} I_{ef} \Big|_{t_a}^{t_{cc}} \quad (8)$$

A apresentação desses conceitos e equações constitui um breve resumo de assuntos bastante discutidos na literatura de soldagem. Os temas até então abordados foram considerados base para as interpretações e análises que serão discutidas ao longo deste trabalho. Em seguida serão abordadas algumas das modalidades do MIG/MAG que se utilizam do recurso de avanço e recuo do arame.

2.4. VERSÕES MIG/MAG COM ATUAÇÃO NO RETORNO DO ARAME

Para o processo MIG/MAG, a atuação no retorno do arame está diretamente ligada às condições de transferência metálica. As versões que utilizam esta filosofia 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. Nesses casos, os valores apresentados podem ser considerados relativamente altos, chegando a frequências de até 130 Hz [31,32]. A adição do movimento de recuo do arame tem a principal função de promover o destacamento da gota (Figura 15). São exemplos de versões dessa categoria: o MIG/MAG CMT (*Cold Metal Transfer*) da empresa FRONIUS, o CSC (*Controlled Short Circuit*) da empresa Jetline, o AWP (*Active Wire Process*) da PANASONIC e o microMIG da SKS. Em uma revisão de versões avançadas do processo MIG/MAG, Kah et al. [33] classificaram essas modalidades que utilizam o recuo do arame com

o nome de “transferência de gotas mecanicamente assistida” (Mechanically assisted droplet transfer), mas mencionam em seu trabalho apenas o CMT e MicroMIG. Dentre todas as modalidades citadas pode se dizer que o CMT é a versão com utilização mais difundida mundialmente, e, por esse motivo, será apresentado em maiores detalhes no capítulo 3.

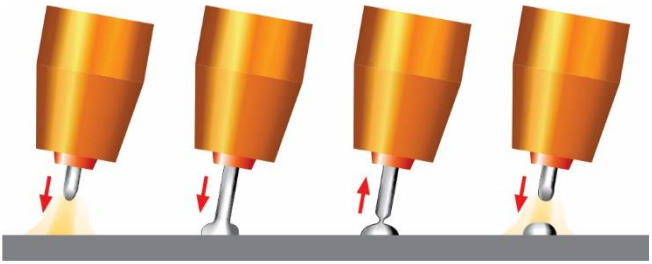


Figura 15 - Movimento de avanço e recuo do arame para o MIG/MAG, adaptado de [34]

Devido à exigência de elevada frequência de inversão no sentido do arame, um dos pontos determinantes para o funcionamento adequado da soldagem MIG/MAG com alimentação dinâmica está na tecnologia utilizada como atuador para o movimento de avanço e recuo do arame. A variante denominada CSC, utiliza uma tocha projetada com dois motores de passo. O equipamento, que pode ser visto na Figura 16, é desenhado para uso em operações mecanizadas e não foram encontrados modelos de tocha para uso manual. Apesar de o fabricante não deixar explícito o motivo para utilizar dois motores, a hipótese aqui colocada é de que cada motor fica responsável por um sentido do movimento, ou seja, um motor comanda o avanço e o outro o recuo. Com isso, seria possível se obter uma melhor resposta no tempo de inversão movimento do arame, com um motor ajudando o outro nos momentos de desaceleração. De qualquer forma, não existem maiores detalhes sobre o tipo de mecanismo utilizado nesse equipamento.

Com relação aos parâmetros elétricos de soldagem e o formato de onda de corrente imposta pelo equipamento, o CSC possui duas fases principais: a fase de arco e a fase de curto-circuito. O controlador monitora a tensão de arco e compara com limites definidos por “Voltage Hi” e “Voltage Lo” que correspondem, respectivamente, aos limites da fase de arco e da fase de curto-circuito. Cada fase é dividida em três segmentos: início, pulso e fim. Durante a fase de arco é fornecida a

energia necessária para formação da gota e da poça. A gota é depositada na fase de curto-circuito, com o contato entre o arame e a peça. Quando a tensão de arco cai abaixo da referência “Voltage Lo”, o sistema de controle classifica como “fase de curto-circuito” e o arame começa a ser retraído. Quando a tensão medida está acima da referência “Voltage Hi”, o controle identifica como sendo a “fase de arco” e o arame é recuado até o ponto definido como referência do comprimento do arco [35]. A Figura 17 mostra um diagrama esquemático do ciclo de corrente do CSC apresentado pelo fabricante.

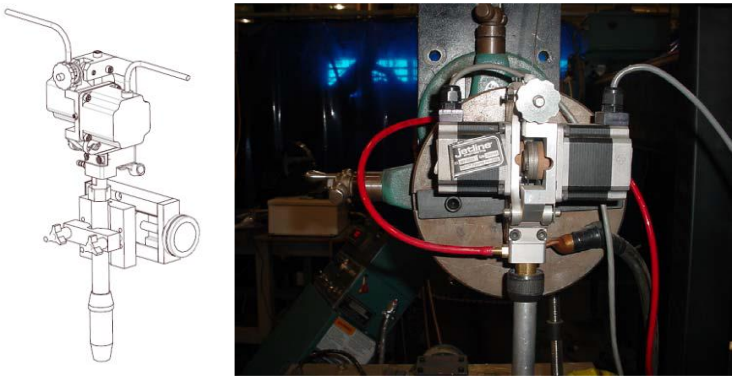


Figura 16 – Tocha de soldagem MIG/MAG CSC [35]

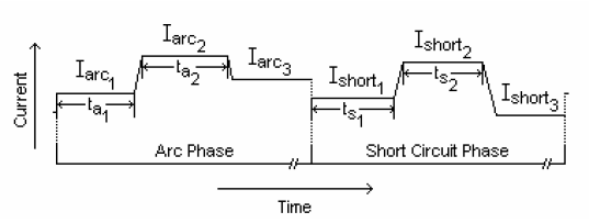


Figura 17 – Diagrama esquemático do ciclo de corrente para o CSC [36]

Para a versão AWP e MicroMIG poucos (ou talvez nenhum) trabalhos científicos com referência ao uso dessas modalidades estão disponíveis atualmente. Muitas das informações encontradas são de caráter estritamente comercial, como aquelas disponíveis nos catálogos e nos sites dos fabricantes [37,38].

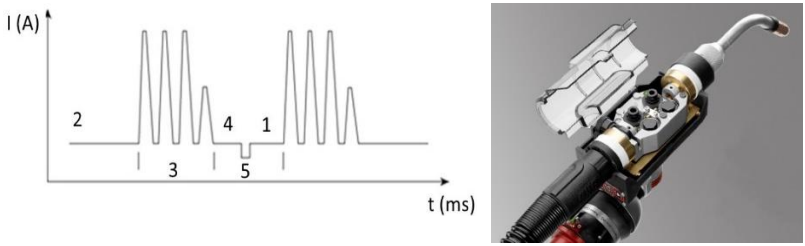
Segundo os dados apresentados pela Panasonic Robotic, a principal vantagem da variante AWP é a grande redução no nível de

respingos, inclusive em situações com amplas variações do ângulo de ataque da tocha (empurrando /puxando), utilizadas em condições de pouca acessibilidade da tocha. Os valores citados são da ordem de 90% menos respingos para soldagens com CO_2 puro, em comparação com o MIG/MAG convencional, em uma faixa de corrente de 200 A. A justificativa apresentada por Hirota et al [39] está no fato de que a adição do movimento de recuo no instante do destacamento possibilita uma reabertura do arco com baixo valor de corrente, sem a ocorrência de micro explosões ou repulsão de gotas gerada por forças eletromagnéticas associadas com altas correntes. Não foram encontradas informações a respeito das formas de onda aplicadas pelo AWP, tampouco uma descrição sobre a lógica de funcionamento, com exceção de figuras ilustrativas do movimento de recuo do arame, de maneira semelhante à Figura 15.

Para a versão MicroMIG, além de citar a redução de respingos, o fabricante destaca a redução no aporte térmico, com melhor controle da penetração. São observadas duas características principais dessa variante. A primeira está na intercalação entre um evento de curto-circuito com uma sequência de transferência por voo livre. A forma de onda de corrente que ilustra o MicroMIG pode ser vista na Figura 18-A. Os números indicativos foram mantidos de acordo com a marcação do fabricante, apesar de não estarem condizentes com a explicação contida no site [38]. Na região indicada pelo (3) tem-se uma sequência de pulsos de corrente responsável pela formação e transferência de gotas por voo livre. O último pulso da sequência, de menor amplitude, fornece energia suficiente para gerar uma gota, mas não o suficiente para causar o destacamento. Sob um baixo valor de corrente, o arame é avançado na direção da poça. Com o contato, a gota formada é então depositada na poça e o arame inicia o movimento de recuo. Após a reabertura do arco, o arame continua sendo retraído por um tempo pré-definido. Em seguida, com a reversão no sentido do arame se dá o início de um novo ciclo de pulsação da corrente. Em uma soldagem com alimentação dinâmica, à medida que se aumenta velocidade de arame regulada para a soldagem, também é necessário aumentar a frequência de transferência, que é determinada pelos movimentos de avanço e recuo do arame. Essa movimentação em alta frequência gera desgaste excessivo do motor e, sob essa justificativa, foram adicionados os pulsos de corrente intercalados aos curtos, objetivando reduzir a frequência de inversão no movimento do arame [38].

A segunda característica observada para o microMIG está relacionada com o dispositivo alimentador de arame. O sistema de

alimentação opera com somente um motor na tocha que, além de atuar no controle da transferência metálica durante o curto-circuito, trabalha puxando o arame do carretel ou bobina. A afirmativa do fabricante é de que com isso os problemas de sincronismo dos sistemas push-pull são eliminados. Não se tem a informação de terceiros confirmando a eficiência e robustez dessa filosofia. A Figura 18-B mostra a tocha robótica com o sistema tracionador de arame. Também não foram encontradas informações com relação ao tipo de motor utilizado pelo MicroMIG.



A **B**

Figura 18 – MIG/MAG microMIG da SKS; A – Curva característica de corrente; B – Tocha robótica com dispositivo tracionador de arame [38]

3. MIG/MAG CMT

Dentre as modalidades do processo MIG/MAG com alimentação dinâmica do arame, seguramente pode-se dizer que o CMT (*Cold Metal Transfer*) é a versão com maior número de trabalhos publicados e exemplos de utilização no mundo. Desenvolvido pela empresa austríaca Fronius, com lançamento no ano de 2004, tem como características principais um baixo nível de respingos (em alguns casos nenhum), excelente estabilidade do arco e da transferência metálica, boa capacidade no controle da diluição e ainda, em comparação com algumas versões do MIG/MAG, um baixo aporte térmico para a peça.

Por causa do estereótipo criado com relação ao seu aporte térmico é que, de maneira generalizada e, muitas vezes, equivocada, o CMT é dito como sendo um processo frio, o que é sugerido pelo seu próprio nome. É comum verificar autores que se utilizam dessa afirmativa como justificativa para os resultados alcançados em seus trabalhos. Vale então ressaltar que, dependendo do ponto de comparação, isso pode não ser bem verdade, o que torna muito mais complexa a correta análise para determinar as causas de um resultado encontrado.

Sabe-se que nem toda energia fornecida pelo arco é transferida para a peça, sendo uma parte dela dissipada para o meio. A maneira mais aceita como forma de se determinar o correto valor da quantidade de calor recebida pela peça é por meio de medições com calorímetros. Em um trabalho avaliativo do desempenho de calorímetros de nitrogênio líquido e fluxo contínuo, Arevalo e Vilarinho [40] realizaram a comparação de diferentes versões do processo MIG/MAG, com o intuito de determinar seus valores de rendimento térmico global. Dentro das condições ensaiadas por esses autores, o valor médio de rendimento térmico para o CMT foi próximo de 76%, enquanto que no trabalho de Pepe et al. [41], o CMT apresentou o valor de rendimento térmico de 85%. Como os parâmetros de soldagem utilizados na realização dos ensaios desses dois trabalhos foram totalmente diferentes, Arevalo e Vilarinho justificam dessa forma a discrepância apresentada nos valores medidos. Apesar da diferença, ambos se encontram dentro da faixa de rendimento térmico que a literatura cita para o processo MIG/MAG, entre 75 e 90% [42]. Para o MIG Convencional por curto circuito, os valores apresentados por Arevalo e Vilarinho tiveram uma média próxima a 79 % [40].

A determinação do valor de rendimento térmico não pode ser generalizada para uma versão ou processo de soldagem. Mesmo quando se está avaliando uma única versão, alterações de parâmetros como a

distância do bico de contato até a peça, o comprimento do arco, o modo de transferência, entre outros, tem impacto direto na quantidade de calor imposto à peça devido a variações nas taxas de dissipação e perdas para o ambiente. O rendimento térmico é determinado com base na relação entre a energia recebida pela peça, que foi medida com o auxílio do calorímetro, e a energia fornecida pela fonte de soldagem, conforme a equação 9 [42]. A energia fornecida pela fonte é dada pelo produto entre a potência média instantânea e pelo tempo de solda. Acontece que, em soldagem, o cálculo da potência muitas vezes é erroneamente realizado pelo simples produto entre a tensão e corrente (U x I), utilizando valores médios ou eficazes. Como abordado em trabalhos anteriores do presente autor [7,9,43], o procedimento correto deve considerar toda a variação da relação *U x I* no tempo, seja no cálculo de sua integral (equação 10), seja no cálculo discreto de uma amostragem obtida por um sistema de aquisição de dados (equação 11). Por fim, o aporte térmico por unidade de comprimento de solda é calculado pela equação 12. Tradicionalmente, o cálculo do aporte térmico é acometido de erros devido à problemas no cálculo da potência e a desconsideração do fator de rendimento térmico global [44].

$$\eta = \frac{Qt_{solda}}{Q_{nominal}t_{solda}} = \frac{Q}{Q_{nominal}} \tag{9}$$

$$Q_{nominal} = P = \int_0^{t_{solda}} U(t).I(t)dt \tag{10}$$

$$P = \frac{\sum_{i=1}^{n} U_i I_i}{n} \tag{11}$$

$$AT = \frac{P}{Vs}\,\eta \tag{12}$$

Em trabalho anterior de Marques [7] foram apresentados resultados em que o CMT produziu uma soldagem com um maior nível de potência do que a versão convencional do processo MIG operando com curto-circuito. Como condição para o ensaio foi mantida a mesma velocidade de soldagem e arame para os dois casos. O trabalho, que foi realizado com alumínio naval ER5183 indica que, se for considerado um

mesmo valor de rendimento térmico global para as duas versões, o MIG convencional pode ser capaz de fornecer um menor aporte térmico que o CMT, ou seja, uma solda mais “fria”.

Com a realização de um ensaio preliminar verifica-se essa situação. Foram realizados depósitos sobre chapas de alumínio com 6 mm de espessura, utilizando o CMT e o MIG convencional por curto-circuito. O arame utilizado foi o ER4043 de 1,2 mm de diâmetro. Foi mantida a velocidade de soldagem de 60 cm/min em ambos os casos, assim como fora também mantida a velocidade de arame de 6 m/min, a distância do bico de contato à peça em 15 mm e as dimensões do corpo de provas (195 x 120 mm). Como forma de verificar o aquecimento da chapa monitorou-se o lado posterior à solda com uma câmera térmica. Também foram adquiridos os sinais elétricos de tensão, corrente e velocidade de arame. A Tabela 1 apresenta os principais valores elétricos obtidos, onde pode-se verificar que o valor da potência no modo CMT foi cerca de 48% maior do que para o modo convencional. As imagens térmicas obtidas são mostradas na Figura 19. Para viabilizar uma análise qualitativa, as duas imagens (A para convencional e B para CMT) são apresentadas em uma mesma escala de temperatura. Fica evidente que o ensaio com CMT resulta em um maior aquecimento da chapa, o que também pode ser observado na Figura 20, com a apresentação dos perfis de temperatura. É sabido que uma das dificuldades associadas com a termografia está na incerteza dos valores lidos em função da correta definição do valor de emissividade do material. Em chapas de alumínio, cuja emissividade tem valores relativamente baixos, a situação é agravada. No caso em questão, ambas chapas se encontravam com mesmo acabamento superficial, a câmera não foi movida de posição durante o ensaio e a emissividade foi determinada com o valor de 0,3. Sendo assim, considera-se que os valores obtidos de fato representam bem as reais temperaturas alcançadas pela peça. A diferença de temperatura registrada entre o CMT e o convencional foi da ordem de 40°C.

Tabela 1 – Parâmetros elétricos medidos em ensaio preliminar comparativo entre MIG convencional e CMT na soldagem de alumínio

	MIG Convencional	*CMT*
U_{med} *(V)*	14,4	15,4
I_{med} *(A)*	105	110
U_{ef} *(V)*	15,3	17,6
I_{ef} *(A)*	114	124
V_a *(m/min)*	6,0	6,0
P (W)	1438	2126

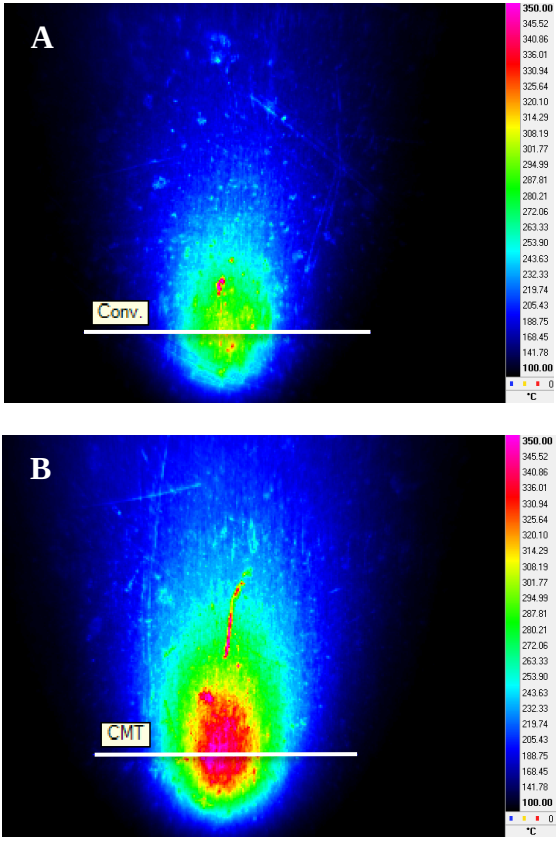


Figura 19 – Imagem termográfica de face posterior de chapa de alumínio com 6 mm de espessura durante realização de soldagem com duas versões do processo; A – MIG Convencional, potência média instantânea = 1438 W; B – MIG CMT, potência média instantânea = 2126 W

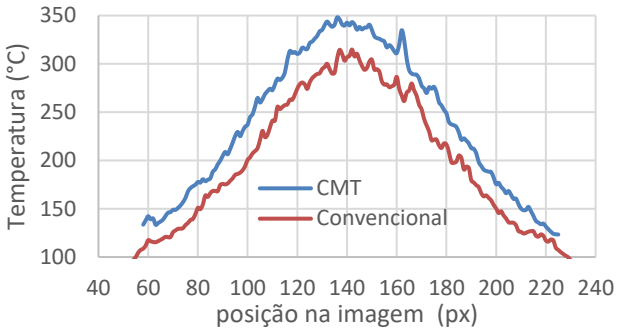


Figura 20 – Perfil de temperatura na região indicada nos termogramas da Figura 19

Esse é um caso em que não se poderia afirmar que o CMT traz resultados melhores porque é um processo frio. Pelo contrário, nesse exemplo poder-se-ia dizer que o maior aporte térmico do CMT trouxe resultados diferenciados. É o que mostra o aspecto visual do depósito, na Figura 21. De fato, o resultado com o modo convencional apresenta um cordão com superfície bastante irregular, visivelmente obtido pela menor energia térmica entregue à peça.

Figura 21 – Aspecto visual de depósitos de alumínio com MIG convencional e CMT

Uma grande maioria dos trabalhos publicados sobre o CMT simplesmente prolifera a informação de que essa é uma versão do processo que possui um menor aporte térmico. Em alguns casos a afirmativa é válida, como no trabalho de Picking e Young [45] que realizam uma comparação entre o CMT e o modo MIG pulsado Sinérgico, também para a soldagem de alumínio. Para essa comparação, a conclusão apresentada é que, entre eles, o CMT fornece um menor aporte térmico com uma maior taxa de fusão. O presente trabalho pretende trazer à tona essa discussão, mostrando que a flexibilidade oferecida pelo CMT é que

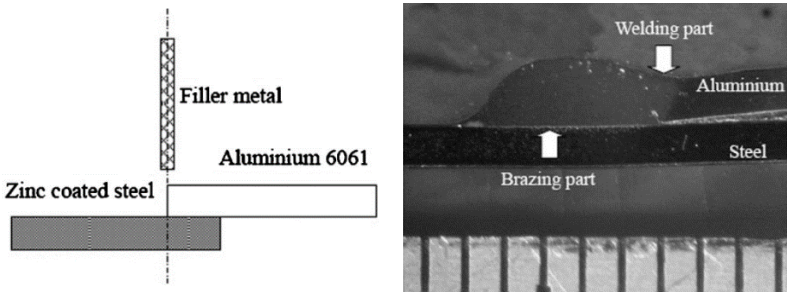
de fato pode ser a causa para o sucesso nas mais variadas aplicações, como está colocado no item que segue.

3.1. APLICAÇÕES DO CMT

A primeira aplicação atribuída para o CMT aconteceu na indústria automotiva. Com o objetivo de se utilizar materiais que proporcionem uma melhor absorção de impactos em colisões, redução no peso e, consequentemente, uma economia no consumo de combustíveis e redução nos teores de emissão de poluentes para a atmosfera, o alumínio tem sido bastante usado na fabricação de veículos. E foi com base nas novas concepções de carrocerias e estruturas que surgiu a necessidade de se unir peças de materiais dissimilares, especificamente, o alumínio com o aço. Métodos como a soldagem por explosão ou a soldagem por atrito (*Friction Stir Welding*) já são utilizados para a união desses materiais desde os anos 1960, mas podem ser aplicados somente em peças com geometria bastante específica [46,47]. Por esse motivo, a flexibilidade oferecida pelos processos de soldagem por fusão tornou-se atrativa para o setor.

A problemática associada à união de alumínio com aço e os resultados obtidos utilizando como base o processo MIG/MAG CMT são tratados em diversos trabalhos [48,49,50,47,51,46]. Apesar dos bons resultados alcançados pelo CMT, cabe ressaltar que versões como o MIG AC também tem capacidade de produzir resultados satisfatórios, esclarecendo que o CMT não é a única opção para execução dessa união [52]. As diferenças químicas e físicas entre os dois materiais, como ponto de fusão, coeficientes de dilatação, condutividade elétrica, e a insolubilidade do alumínio no aço conduzem a formação de uma fase intermetálica extremamente frágil, que prejudica a resistência mecânica da união [48]. Os melhores resultados em termos mecânicos são obtidos quando a camada intermetálica não ultrapassa 10 µm de espessura, o que, segundo alguns autores, tem relação direta com a quantidade de calor imposto à peça [48]. Um menor aporte de calor resultaria em uma menor camada intermetálica. De fato, não somente a quantidade de calor deve ser observada, mas principalmente o fato de não ser admitida uma penetração do material de adição (arame de alumínio) na chapa de aço. Nesse caso, a penetração pode ser influenciada por outros fatores, como o próprio posicionamento do arame com relação a junta. Sendo assim, a

condição ideal para a realização desse procedimento de união deve ser uma soldagem do lado do alumínio, com a fusão da chapa de base, e uma brasagem do lado do aço, onde o material de adição deve somente aderir à superfície com o seu molhamento e capilaridade. Para melhorar as características de molhabilidade do alumínio no aço é que sempre são utilizadas peças galvanizadas [53]. A Figura 22 exemplifica uma união entre alumínio e aço-galvanizado, que alguns autores definem pelo o termo solda-brasagem [46].



A **B**

Figura 22 – Exemplo de união do tipo solda-brasagem entre alumínio e aço galvanizado realizada com CMT; A – configuração da junta e posição relativa do arame; B – macrografia da região de união [49]

A apresentação de características como uma excelente estabilidade de arco e um baixíssimo nível de respingos em uma transferência por curto, fizeram com que ainda mesmo no setor automotivo surgissem outros exemplos de aplicação para o CMT, como a soldagem de chapas finas [34,54]. Quando se trata da soldagem de partes da carroceria, a formação de respingos implica em uma necessidade de retrabalho para a remoção daqueles que aderirem à superfície próxima da solda, o que deve ser feito antes das etapas de tratamento superficial e pintura. Em outras peças, como por exemplo tubos de escapamentos, o desprendimento de eventuais respingos da região interna pode acabar comprometendo a vida útil de componentes como os catalisadores ou silenciosos, que possuem em seu interior peças de material cerâmico. Com base nisso, a realização de uma soldagem utilizando uma versão convencional por curto-circuito acaba onerando o procedimento com custos adicionais. A união de peças finas poderia ainda ser realizada utilizando uma versão MIG Pulsada, onde também é possível obter a isenção de respingos. Entretanto, devido ao seu maior aporte térmico, existe uma maior tendência para um aumento

no nível de distorções e empenamentos, além de uma maior possibilidade de perfuração. Novamente aqui a versão MIG AC aparece como uma alternativa possível de ser aplicada, como mostram alguns trabalhos da literatura [55,56].

Devido a possibilidade de se conseguir baixos níveis de diluição com o CMT, Egerland [57] apresenta-o como uma opção para a realização de revestimento metálico por soldagem, utilizando como exemplo uma aplicação de Inconel 625 em painéis de tubos de caldeira. Em um depósito feito em duas camadas, com espessura total de 2 mm, realizado na posição vertical descendente, os valores apresentados para o teor de ferro na superfície foram de aproximadamente 2%. Sem maiores detalhes técnicos ou científicos, Egerland afirma que o CMT possibilita uma penetração baixa e uniforme, e que a baixa diluição está correlacionada com a alta estabilidade do processo e o baixo aporte térmico. Segundo ele, a redução no volume da poça causada pela periodicidade dos eventos de curto-circuito provoca também uma redução no movimento da poça de metal fundido. Além disso, a deposição com o CMT proporciona uma distribuição mais homogênea dos elementos de liga do metal de adição [57]. Pickin et al. [58] citam que o CMT permite uma regulagem do aporte térmico para a peça em função da alteração no tempo de curto-circuito, e que isso de fato pode contribuir para resultados de baixa diluição em depósitos de revestimento. Dutra et al. [59] realizaram uma comparação entre as versões MIG/MAG Pulsado CC, MIG/MAG Pulsado CA e MIG/MAG CMT visando a soldagem de revestimento em painéis de tubos de caldeira com arame de Inconel 625. O diferencial do ensaio foi o fato de o painel ser mantido na posição plana, o que acaba contribuindo para o aumento na penetração. Os ensaios realizados sobre chapa mostraram que, de tão baixa, a menor diluição do CMT em alguns pontos deixou dúvidas quanto a fusão na chapa de base. A Figura 23 mostra o resultado comparativo entre as três versões avaliadas, onde é possível se verificar o baixo nível de penetração obtido com o CMT.

Figura 23 - Resultado comparativo de revestimento com Inconel 625 usando três versões do processo MIG/MAG; A – Pulsado CC; B – Pulsado CA; C – CMT [59]

Na soldagem de união de chapas espessas, onde há necessidade da realização de múltiplos passes, o CMT também é mencionado em alguns trabalhos como opção para a realização do passe de raiz. Fokens [60] cita a utilização do CMT na soldagem orbital de um vaso de pressão de aço carbono destinado ao transporte de gás natural, com diâmetro de 42” e espessura de 19,1 mm. Sem fornecer muitos detalhes importantes para a reprodução do procedimento, a informação colocada é de que se tratava de uma junta estreita, preparada com um bisel J e ângulo de 5º. O autor cita ainda que a velocidade de alimentação utilizada variava entre 4,5 e 6,5 m/min, para arame de 1,0 mm, e a velocidade de soldagem variava entre 35,5 cm/min e 50,8 cm/min. As principais vantagens do CMT elencadas por Fokens foram a capacidade de realizar uma solda de raiz em chanfro estreito e a geometria plana obtida no cordão visto pelo lado da raiz. Reduzir a abertura do chanfro contribui para a redução no tempo total de soldagem, devido à menor quantidade de material que precisa ser depositada nos passes de enchimento. Já o acabamento interno obtido, com uma raiz de geometria plana, contribui na prevenção de cantos vivos concentradores de tensão, que podem ser formados em reforços excessivos. Isso elimina a necessidade de retrabalho na parte interna do tubo, o que dependendo do seu diâmetro, torna-se totalmente inviável.

Também para a soldagem de raiz, Kim [61] apresenta resultados obtidos em chapas de aço com espessura 16 mm, dispostas em junta de topo. Com chanfro usinado em V, foram testados dois ângulos de abertura (30º e 45º) e variações no espaçamento entre chapas (gap) de 0 a 6 mm. Para o ângulo de 30º, os resultados indicaram uma dificuldade de penetração nos gap’s menores que 2 mm (Figura 24 - A1). A situação foi

melhorada quando o ângulo de abertura passou para 45º. A falta de penetração nas juntas mais fechadas, com gap reduzido, foi associada com a baixa pressão do arco do modo CMT [61]. Apesar de terem sido apresentados resultados que foram considerados satisfatórios pelo autor, algumas de suas macrografias demonstram a mesma tendência de problema identificada em trabalhos recentes do Labsolda. Em ensaios para determinação de um procedimento de raiz orbital em tubos de aço carbono, Sartori [62] identifica problemas de falta de fusão nos flancos do chanfro, quando utilizou a versão CMT em chanfros do tipo V. O problema está indicado por um círculo vermelho na macrografia 3 da Figura 24, onde é possível se comparar alguns dos resultados apresentados por Kim e Sartori. Apesar de a solda ter geometria superficial e reforço de raiz com aspectos muito bons percebe-se, nas regiões apontadas por setas, que a penetração da solda (quando existe) é bastante pequena e deixa ainda evidente a linha definida pela geometria original do chanfro. Isso coloca dúvidas quanto a real fusão do chanfro e, mesmo que tenha ocorrido a fusão da peça nessas regiões, cabe ressaltar que o procedimento dessa forma especificado pode se tonar pouco robusto ou repetitivo.

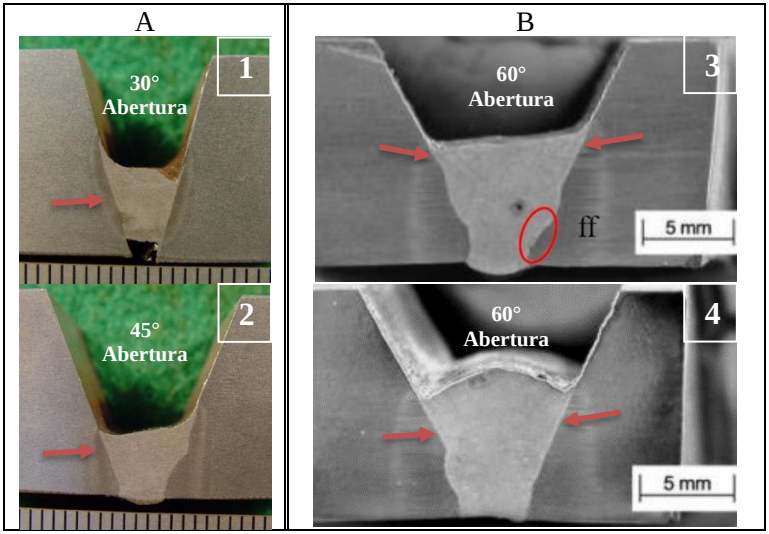


Figura 24 – Comparação de resultados de soldagem de raiz com MIG CMT apresentados nos trabalhos de Kim [61] em (A) e de Sartori [62] em (B).

No mesmo trabalho e agora em concordância com Fokens [60], Sartori [62] apresenta bons resultados de raiz com a versão CMT, em juntas montadas com bisel tipo J. Na imagem da Figura 25 verifica-se uma boa fusão da junta, com uma geometria adequada tanto na face do cordão como na raiz. Nas posições vertical (3h) e sobrecabeça (5h) observa-se ainda o aspecto plano da raiz citado por Fokens.

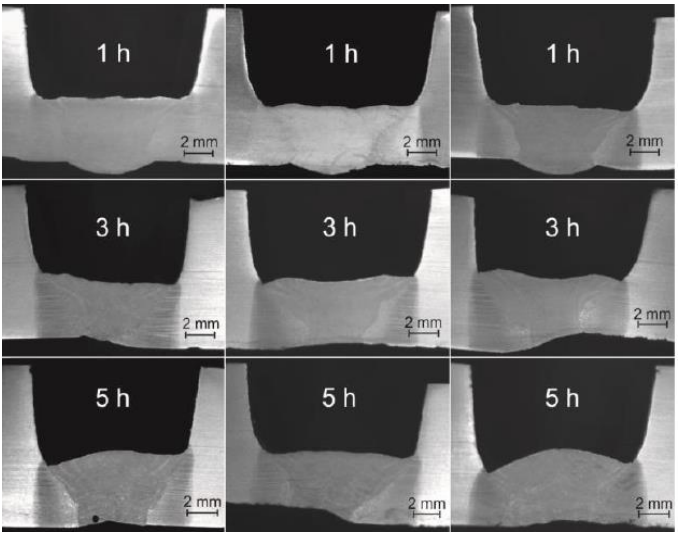


Figura 25 – Resultados de raiz com CMT em soldagem Orbital de tubos de 18” (cada coluna de imagem corresponde à um corpo de prova) [62]

Na soldagem de raiz em chapas de alumínio, Marques [7] desenvolveu em seu trabalho de mestrado um procedimento para a união de chapas de alumínio naval 5083 aplicadas na construção de um veleiro oceanográfico com 60 pés de comprimento (aproximadamente 18 m). Em comparação com outras versões do processo MIG, o CMT foi aquela que apresentou os melhores resultados, como mostra a Figura 26. Nela é possível verificar que a soldagem feita com o MIG convencional (b) apresenta um reforço de raiz excessivo com a presença de cantos vivos, o que pode ser um concentrador de tensões. O aspecto superficial do cordão no chanfro também apresenta certa irregularidade, com cantos que podem facilitar a falta de fusão na realização dos passes seguintes.

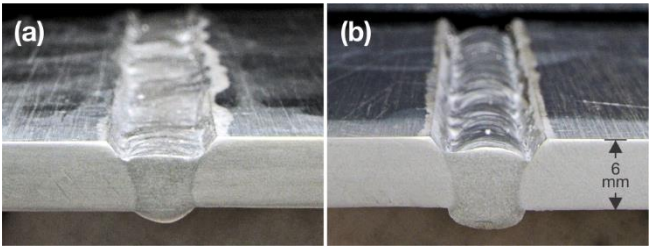


Figura 26 - Soldagem de passe de raiz em alumínio naval; a) MIG CMT; b) MIG Convencional

Dentro das aplicações mais recentes do CMT e suas versões pode-se citar o desenvolvimento de trabalhos com enfoque na manufatura aditiva. Os avanços tecnológicos relacionados com esse processo de fabricação fazem com que cada vez mais a manufatura aditiva seja vista com uma alternativa atrativa para o processamento de materiais. Essa técnica, que consiste na fabricação de peças pela deposição de um material em camadas, pode utilizar diferentes processos como fonte de energia para a fusão do material que está sendo depositado, como por exemplo o Laser, o feixe de elétrons ou a soldagem a arco. Alberti et al. [63] citam o CMT como sendo uma das versões dos processos de soldagem a arco que vem sendo avaliada por centros de pesquisa de referência na área. O potencial de aplicação do CMT é observado para diferentes tipos de materiais como aços, alumínio [64], níquel e ligas de titânio [65]. O trabalho de Cong et al. [64] apresenta um estudo comparativo de diferentes versões do CMT na formação de poros em depósitos multicamadas feitos com uma liga de alumínio. Como resultado, os autores verificam a menor incidência de poros quando foi utilizada a versão CMT Advanced Pulse, que intercala períodos de pulsação de corrente com período de inversão de polaridade. Na Figura 27 é possível constatar o resultado obtido com essa versão, em depósitos realizados com 14 camadas.

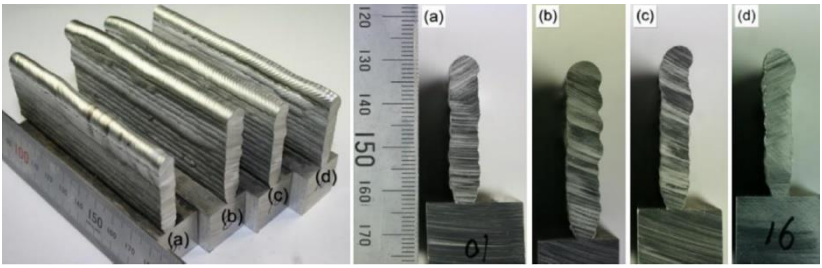


Figura 27 – Depósitos multicamadas apresentados por Cong et al. [64] na soldagem com CMT Advanced Pulse e liga de alumínio cobre (AA2319)

3.2. ASPECTOS CONSTRUTIVOS E FUNCIONAMENTO

Como premissa fundamental para o seu funcionamento, a cada período de transferência o modo CMT tem a necessidade de promover a fusão do material de adição, formar uma poça de material fundido na peça e depositar a gota por meio do avanço e recuo do arame. Para tanto, como todo equipamento de soldagem MIG/MAG, o CMT é composto basicamente por uma fonte, cabeçote alimentador de arame e tocha que, por sua vez, se assemelha à de um sistema *push-pull*. O principal diferencial fica por conta do sistema de alimentação de arame e seu controle, que deve atender ao requisito de movimento de avanço e recuo em frequências bastante elevadas, podendo chegar em até 130 Hz [66]. Para se alcançar esse objetivo, a alimentação do arame é feita por um sistema composto por dois motores, um na tocha e outro no cabeçote alimentador, com o auxílio do dispositivo denominado buffer ou pulmão, instalado no meio do mangote. A Figura 28 mostra a configuração básica dos componentes do CMT.

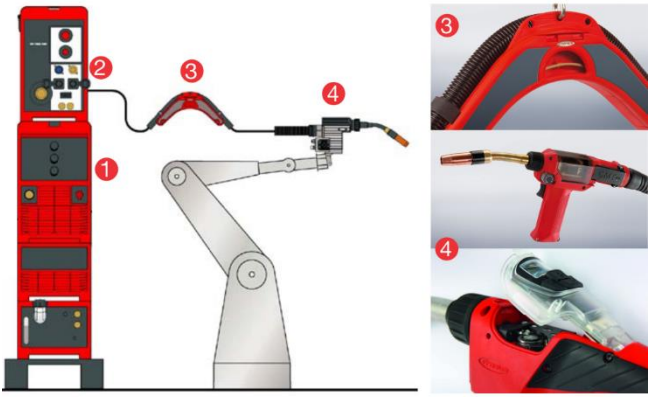


Figura 28 - Disposição de componentes básicos de um sistema CMT. 1 – Fonte de Alimentação; 2 – Cabeçote alimentador; 3 – Buffer de arame; 4 – Tocha, adaptado de [34]

Assim como já foi abordado para as outras versões do MIG/MAG com alimentação dinâmica, o CMT é uma versão do processo com controle de corrente, cuja transferência metálica predominante é dada por curto-circuito. A forma de onda referência apresentada pelo fabricante [67] está de acordo com a Figura 29. As imagens anexadas na mesma figura demonstram a transferência metálica em um depósito feito com arame de alumínio ER4043 de 1,2 mm de diâmetro. 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 (arame parado). Após a abertura do arco, a fonte impõe um pulso de corrente (o fabricante identifica por I_{boost}) que já atua mesmo quando o arame ainda está retornando. O objetivo é promover a fusão do arame e formação da gota metálica durante um tempo de pulso pré-configurado (t_{boost}). 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). 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. 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.

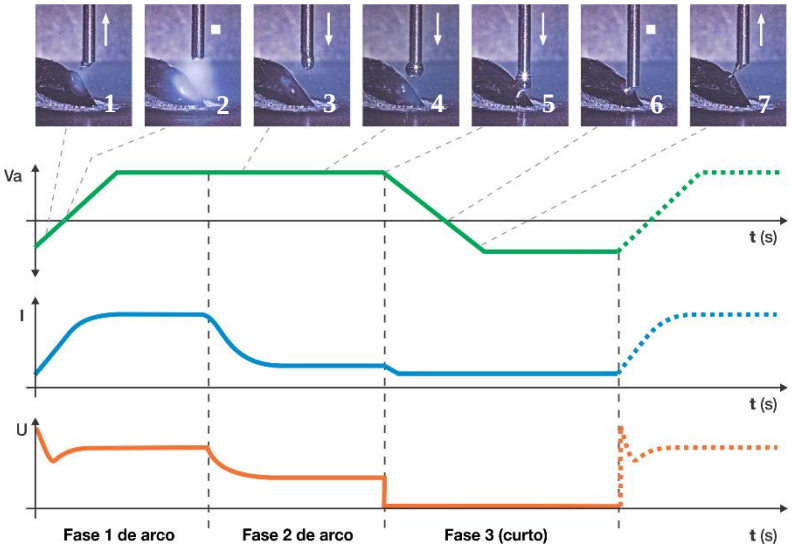


Figura 29 – Oscilogramas idealizados apresentados pelo fabricante, adaptado de [67]

A fonte de soldagem do sistema CMT incorpora a unidade de controle responsável pelo sincronismo entre os parâmetros elétricos de soldagem e de movimentação de arame, conforme demonstrado no diagrama esquemático da Figura 30 (1). O controle é responsável pelo gerenciamento dos motores, da potência referente ao circuito de

soldagem, e da comunicação com a interface do usuário e com o dispositivo manipulador.

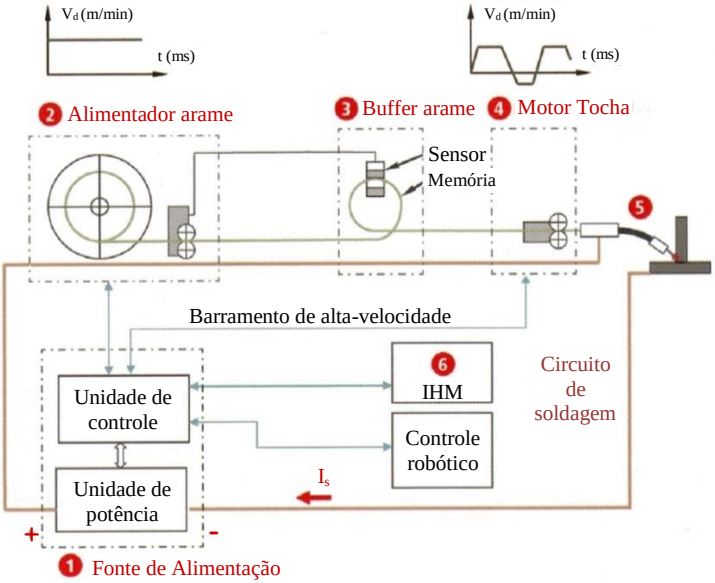


Figura 30 – Diagrama esquemático do equipamento CMT [66]

O motor instalado na tocha, do tipo servo CA, possui alta resposta dinâmica e é responsável pela direta atuação na transferência metálica, invertendo o sentido de rotação em função dos eventos de curto-circuito. O eixo do motor está diretamente ligado ao rolete que traciona o arame, sem o uso de qualquer tipo de redução mecânica ou engrenagem para a transmissão do movimento [66]. Como o arame energizado pelo circuito elétrico da solda está em contato com o rolete, existe a preocupação em se manter um isolamento elétrico dessa peça com o eixo do motor. Algumas opções para viabilizar o isolamento das partes são citadas na própria patente da Fronius [68] como, por exemplo, o uso de uma bucha isolante (de material plástico ou cerâmico) instalada entre o eixo do motor e o rolete tracionador, o uso de um motor com eixo cerâmico e, ainda, o uso de rolamentos especiais com rolos cerâmicos, promovendo o isolamento do rotor para com a carcaça do motor. Para realimentar as informações de posição e velocidade ao sistema de controle, o motor conta com um encoder incremental acoplado ao seu eixo. Apesar de não

se ter a disponibilidade de maiores informações a respeito das características técnicas do motor da tocha e do seu driver de acionamento, os requisitos colocados retratam a necessidade de se ter um motor com características especiais, principalmente quando se trata de uma aplicação em escala industrial.

Enquanto o motor da tocha tem a responsabilidade de atuar na transferência metálica, o motor posicionado no cabeçote alimentador de arame tem a função principal de suprir a tocha com arame proveniente do rolo. Não é premissa do cabeçote realizar o movimento de reversão em função do curto-circuito, o que pode ser observado no diagrama esquemático da Figura 30 [66]. O gráfico de velocidade de deslocamento de arame para o motor da tocha (4) retrata o movimento de retorno do arame com a apresentação de velocidades negativas. Já o gráfico referente ao alimentador de arame (2), retrata que, durante a soldagem, o arame está sendo continuamente alimentado no sentido de avanço.

Entre os dois motores está posicionado o Buffer de arame (3) que, para o motor da tocha, funciona como um dispositivo de armazenamento rápido. Durante o movimento de retorno feito pelo motor da tocha, o arame pode ser prontamente acomodado no interior do buffer. E quando a fase do processo exigir o avanço, também se tem uma disponibilidade imediata de arame com a quantidade (comprimento) disponível no interior do buffer. Observa-se, todavia, que as informações que são fornecidas pelo fabricante a respeito do buffer são pouco detalhadas, e não esclarecem de fato as suas reais funções. Segundo Bruckner et al. [66], o buffer de arame “desacopla os dois motores, garantindo uma alimentação de arame livre de problemas”. Acontece que essa informação, da maneira como foi colocada pelos autores, acaba sendo bastante subjetiva, dando margem a diferentes interpretações. Na Figura 30 observa-se também que estão indicados sobre o buffer as funções de “memória” e “sensor”. A memória do buffer pode ser inferida como o armazenamento de rápido acesso citado anteriormente. Já a função de sensor tem relação direta com o controle de velocidade de arame no alimentador principal. É nesse ponto que, de certa forma, pode ser verificado o citado “desacoplamento” dos motores, o que será discutido em seguida.

A Figura 31 mostra em detalhe a parte interna do Buffer. O arame provindo do cabeçote passa por dentro do conduíte que é suportado por uma alavanca. Conectado ao ponto de rotação da alavanca existe um sensor que realimenta o controlador do motor do cabeçote com sua posição atual. Em uma situação de soldagem que a velocidade média de arame na tocha é igual à velocidade que está sendo fornecida pelo

cabeçote, a alavanca tem a tendência de, em média, se manter na posição central do buffer. Quando há uma diferença entre essas velocidades, a alavanca tende a assumir uma das posições extremas do buffer indicadas na Figura 31 (B e C). Permanecendo nessas posições por determinado tempo, o equipamento apresenta uma mensagem de erro (buffer cheio ou buffer vazio) e interrompe a soldagem.

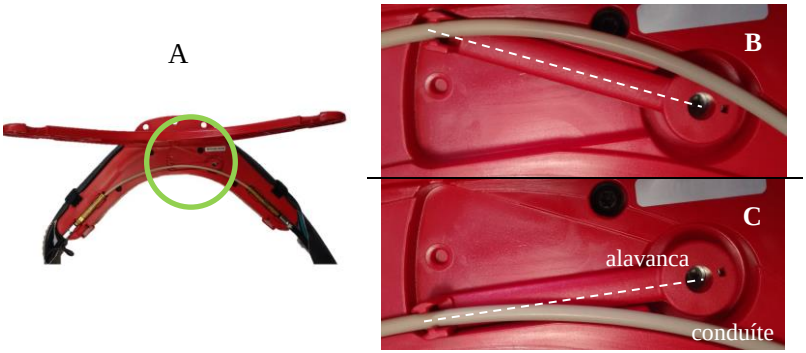


Figura 31 – Buffer de arame do equipamento CMT (A), com detalhe para posicionamento de alavanca do sensor; B – Excesso de arame ou buffer cheio; C – Falta de arame ou buffer vazio

Em trabalho anterior deste autor [7] foram realizados ensaios onde se variou propositalmente a distância do bico de contato à peça, com a realização de um movimento de tecimento na altura da tocha (Figura 32). Como resultado, constatou-se que a velocidade de arame fornecida pelo cabeçote sofreu uma variação que respondeu na mesma frequência do tecimento. A Figura 33 mostra o comportamento da velocidade de arame no tempo (medida no cabeçote alimentador) para frequências de tecimento de 2 e 4 Hz.

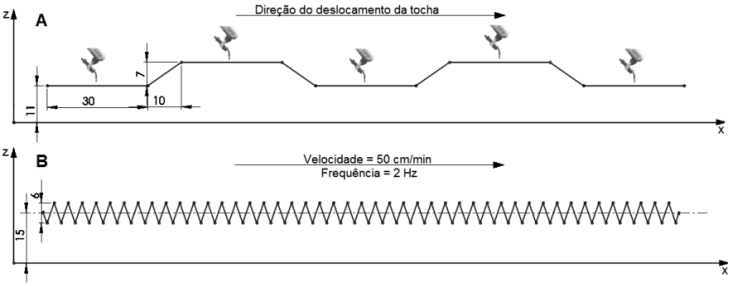
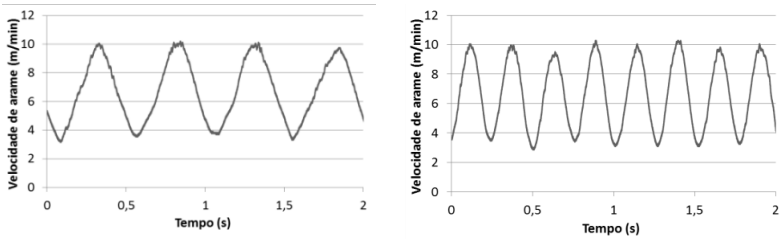


Figura 32– Esquema de movimentação da tocha com variação de altura. A – Variação lenta de altura; B – Variação brusca de altura em 2 Hz e Vs = 50 cm/min [7]



A B

Figura 33 – Resposta na velocidade de arame. A – movimento de tecimento em 2 Hz; B – movimento de tecimento em 4 Hz [7]

Para esses ensaios, quando foram analisados os oscilogramas de tensão e corrente (Figura 34), verificaram-se diferenças significativas nos tempos de curto-circuito causadas pelo movimento oscilatório da tocha. A explicação apresentada foi que quando a tocha está afastando da peça, a velocidade de recuo do arame produzida pelo motor da tocha é somada ao movimento de afastamento, o que acaba provocando uma redução no tempo de curto-circuito. Ainda durante o afastamento da tocha, mas agora no momento que o arame avança para a peça, as velocidades são subtraídas fazendo com que o tempo de arco seja aumentado. Em outras palavras, o arame demora mais tempo para chegar até a peça devido a diferença das velocidades. Além disso, como se tem um aumento na DBCP, o comprimento de arame requerido para provocar o curto é maior. Esse é um dos motivos para que a quantidade de arame consumido do buffer aumente, deslocando a alavanca mostrada na Figura 31 na direção de falta de arame. O sistema de controle do cabeçote alimentador é, então,

realimentado com a alteração na posição média da alavanca, fazendo com que a sua velocidade seja aumentada.

Quando a tocha está aproximando ocorre o inverso, ou seja, há uma tendência de aumentar o tempo de curto-circuito. O motor da tocha tem que puxar mais o arame para descontar a aproximação, uma vez que o valor resultante seria a diferença das duas velocidades [7]. O comprimento de arame adicional que é puxado provoca alteração na posição média da alavanca do buffer, que informa ao sistema de controle da fonte a necessidade de reduzir a velocidade no cabeçote.

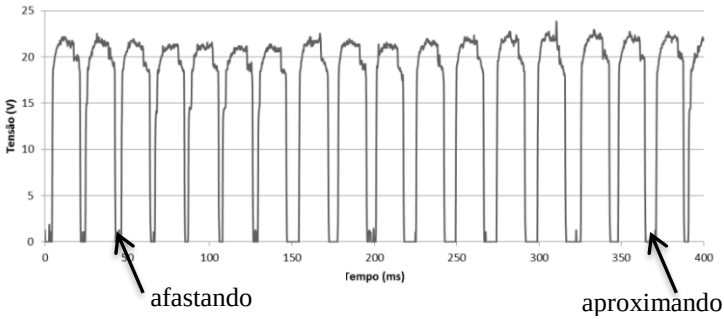


Figura 34 – Diferença nos tempos de curto-circuito em condição de extrema variação na altura da tocha no modo CMT [7]

A influência da posição da alavanca do buffer sobre a velocidade de arame fornecida pelo cabeçote pôde ser verificada durante a realização de um teste preliminar. Para isso, antes mesmo de iniciar uma soldagem com o CMT, o buffer teve sua tampa aberta e o arame foi interrompido, desacoplando a porção utilizada na solda daquela proveniente do rolo. Durante a realização de um depósito, a alavanca do buffer foi manualmente acionada, movendo da posição central para a direção que indica excesso de arame (buffer cheio). O resultado da velocidade de arame fornecida pelo cabeçote está sendo mostrado na Figura 35, onde verifica-se claramente uma alteração na velocidade em função da posição que a alavanca foi imposta. Com isso, a velocidade passou de aproximadamente 4 m/min para algo na faixa de 0,5 m/min. Apesar dessa diferença, os parâmetros elétricos da soldagem não sofreram alteração com a intervenção manual na alavanca, o que pode ser conferido no oscilogramas apresentados na Figura 36. Observa-se que os tempos de arco aberto, de curto-circuito e, consequentemente, a frequência de transferência permaneceram inalterados, mesmo com uma redução significativa na velocidade do arame do cabeçote. A soldagem transcorre

normalmente, já que o arame que está sendo consumido está disponível na porção cortada no buffer.

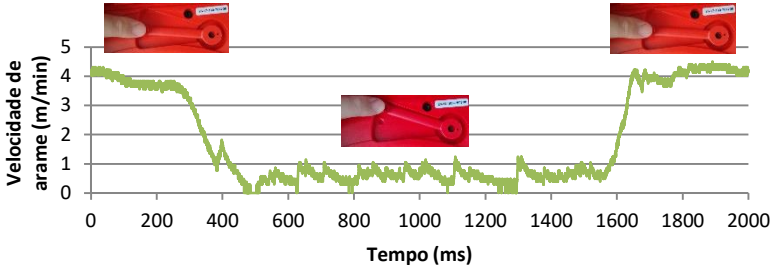
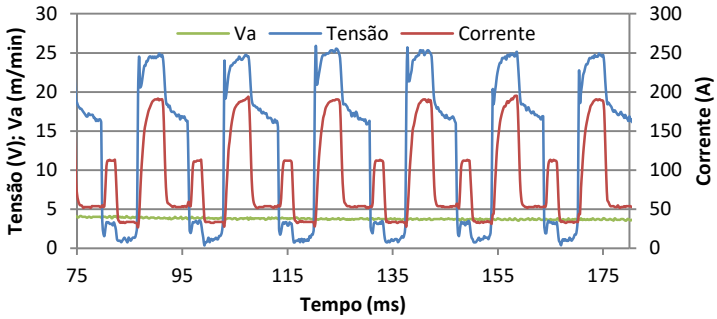
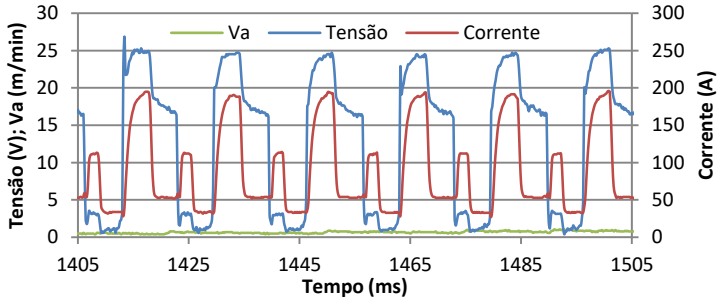


Figura 35 – Resposta da velocidade de arame fornecida pelo cabeçote em função da intervenção manual sobre a alavanca do buffer



A



B

Figura 36 – Oscilogramas de tensão, corrente e velocidade de arame no cabeçote durante ensaio de avaliação do funcionamento do buffer; A – buffer com alavanca em posição central; B – buffer movida na direção de sobra de arame (buffer cheio)

Dessa forma fica clara a informação citada anteriormente de que o buffer “desacopla os dois motores”. Existe aqui uma certa independência entre os controles de velocidade dos motores. Enquanto o motor da tocha responde com as velocidades pré-configuradas pelo programa sinérgico ou usuário, com a função de atuar diretamente na transferência metálica, o motor do cabeçote, que também possui uma referência de velocidade média em função dos parâmetros previamente definidos pelo sinérgico, corrige frequentemente sua velocidade com base na informação obtida pelo sensor do buffer. Obviamente que existem outras metodologias ou algoritmos de controle ligados ao sistema de tracionamento de arame do equipamento CMT, como para o tratamento de situações adversas. Mesmo assim, é notório que uma das principais funções do buffer é facilitar a implementação do sistema de controle de velocidade do motor do cabeçote.

O alto grau de controle do CMT sobre a transferência metálica proporciona algumas vantagens a essa modalidade. Além de oferecer as já citadas reduções nos níveis de fumos e respingos, com alta estabilidade do processo, a inserção do movimento de avanço e recuo do arame confere ao CMT uma alta capacidade de controle da altura do arco. Diferentemente de um modo com transferência por voo livre, onde existe sempre uma distância estabelecida entre a ponta do arame e a peça, quando se tem um modo com curto-circuito, a alteração na distância ocorre ciclicamente. Por esse motivo, referir-se à comprimento de arco em uma soldagem por curto-circuito depende do prévio estabelecimento de um critério para sua definição. Em primeiro momento, o comprimento de arco no modo CMT refere-se à máxima distância alcançada pelo arame no término do movimento de recuo após o evento de transferência (comprimento de arco máximo). Neste quesito é possível constatar que essa modalidade do processo demonstra uma grande capacidade de controle, como colocado em uma sequência de imagens na Figura 37. Para os quatro eventos apresentados, a distância máxima observada é mantida praticamente a mesma.

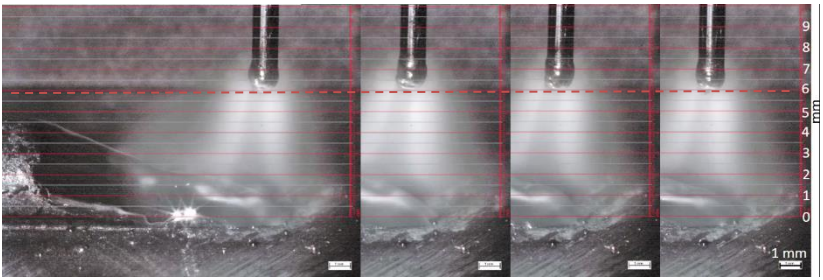


Figura 37 – Sequência de 4 frames no instante de maior comprimento do arco para soldagem CMT com arame de aço inoxidável

A possibilidade de se ter uma referência de altura pelo contato direto do arame com a peça tem relação direta com a capacidade de controle do comprimento de arco máximo. E diferentemente de versões como o modo pulsado, onde comumente é utilizada a tensão como parâmetro de referência para controle, o contato físico do arame com a poça torna o controle do CMT imune a flutuações de tensão em decorrência das condições da peça, como a presença de óxidos, impurezas e sujeira. Para demonstrar a metodologia de controle aplicada pelo CMT, Kazmaier [69] apresenta a Figura 38. O gráfico de tensão colocado em (A) apresenta valores negativos por se tratar de um exemplo sobre o CMT Advanced (variante do CMT que utiliza polaridade negativa). O principal ponto de análise inicia no instante da detecção da abertura do arco, indicada pelo pico de tensão no gráfico (A) e marcado pelo ponto 4 no gráfico de velocidade de arame na tocha (B). A lógica apresentada consiste em, após a detecção da abertura do arco, determinar que o motor da tocha puxe sempre a mesma quantidade de arame. Isso é representado no gráfico pela área hachurada da curva de velocidade compreendida entre os pontos 4 e 5. O que ainda pode-se destacar é a existência de um atraso na desaceleração do arame até o instante marcado pelo ponto 4'. Essa informação difere da curva idealizada apresentada no manual do equipamento CMT e apresentada anteriormente na Figura 29, que mostra que o arame começa a desacelerar no mesmo instante que ocorre a abertura do arco. Como Kazmaier apresenta uma curva de velocidade para o controle do comprimento de arco máximo, fica ainda a dúvida se de fato o CMT utiliza como parâmetro de controle a informação direta da posição (deslocamento) do arame, o que poderia ser feito com base na informação obtida pelo encoder do motor da tocha, ou se de fato a posição é indiretamente controlada pelo controle da velocidade imposta, o que está

muito mais dependente das características dinâmicas de aceleração e desaceleração do motor.

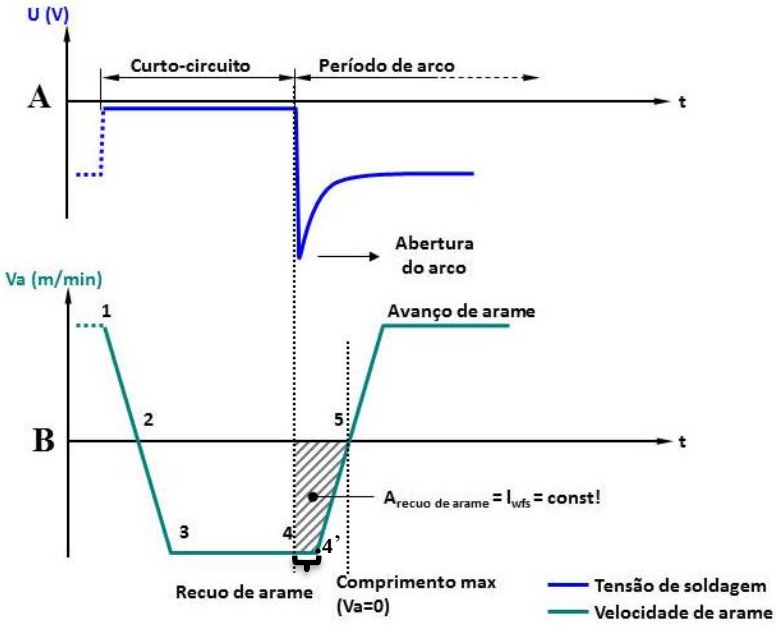


Figura 38 – Metodologia de controle do comprimento do arco para o CMT [69]

3.3. VERSÕES DO CMT

O presente trabalho se concentra no estudo da soldagem MIG/MAG com alimentação dinâmica de arame, cujo representante de maior renome é dado pela versão CMT. Não se tem aqui o objetivo de avaliar em detalhes todas as particularidades inerentes às versões criadas para o modo CMT. Apesar disto, em determinados pontos discutidos no trabalho são abordados assuntos que podem extrapolar os limites do CMT, motivo pelo qual justifica relembrar os conceitos e características principais de cada versão, alguns já abordados em [7].

O MIG/MAG CMT apresenta 4 (quatro) versões principais: CMT, CMT Pulse (CMT +P), CMT Advanced (CMT Adv) e CMT Advanced

Pulse (CMT Adv+P). Basicamente, tratam-se de combinações de modos de transferência e/ou alternância na polaridade. As versões que acrescentam o nome “Pulse” (+P) utilizam um ciclo de pulsação de corrente (modo Pulsado) intercalado com uma sequência pré-determinada de curtos. As versões que acrescentam o nome “Advanced” (Adv) utilizam a inversão da polaridade com o objetivo de reduzir ainda mais o aporte térmico a peça. O modo Advanced Pulse é caracterizado por aplicar um modo pulsado durante a polaridade positiva e o curto-circuito durante a polaridade negativa. Em todas as versões e polaridades a transferência metálica por curto-circuito é assistida pelo movimento de recuo do arame. Como forma de exemplificar as formas de onda impostas pela fonte para cada uma das versões são apresentados os oscilogramas de tensão e corrente correspondentes ao programa sinérgico de alumínio, da Figura 39 a Figura 42.

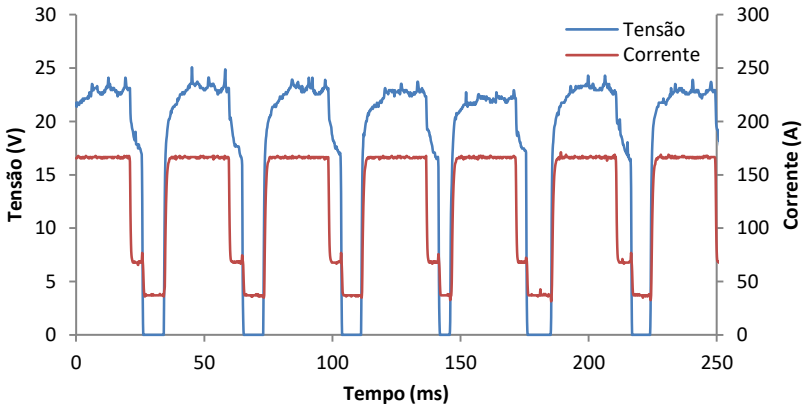


Figura 39 – Oscilogramas de tensão e corrente para o modo CMT, utilizando o programa sinérgico de alumínio AlSi5, arame ER4043 de 1,2 mm, na regulagem de Va = 6,0 m/min

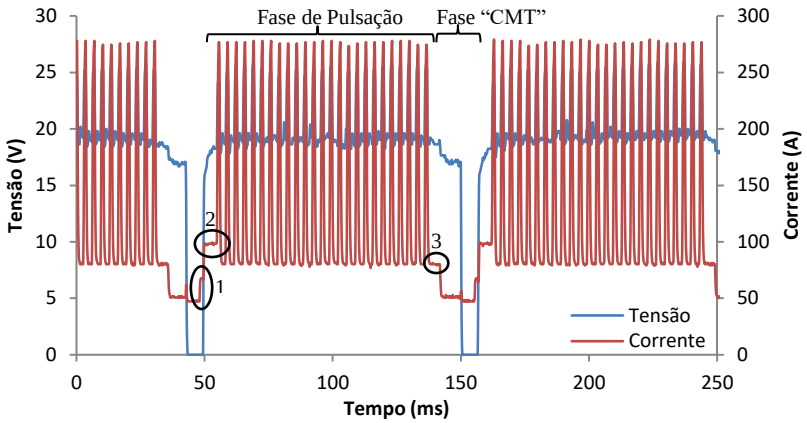


Figura 40 – Oscilogramas de tensão e corrente para o modo CMT Pulse, utilizando o programa sinérgico de alumínio AlSi5, arame ER4043 de 1,2 mm, na regulagem de Va = 6,0 m/min

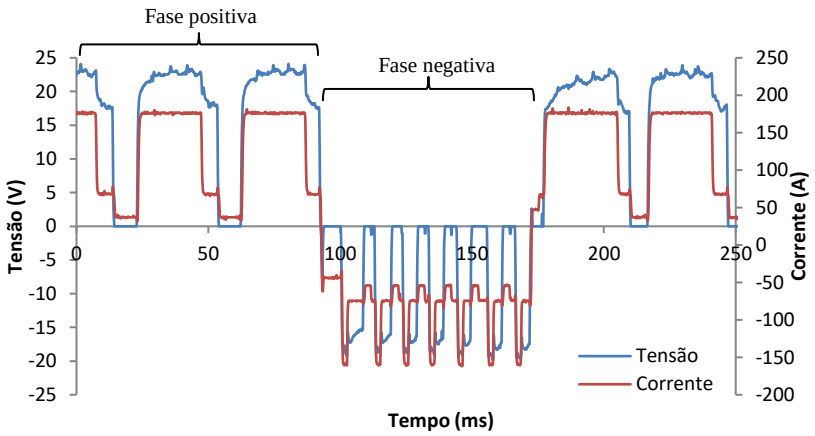


Figura 41 – Oscilogramas de tensão e corrente para o modo CMT Advanced, utilizando o programa sinérgico de alumínio AlSi5, arame ER4043 de 1,2 mm, na regulagem de Va = 6,0 m/min

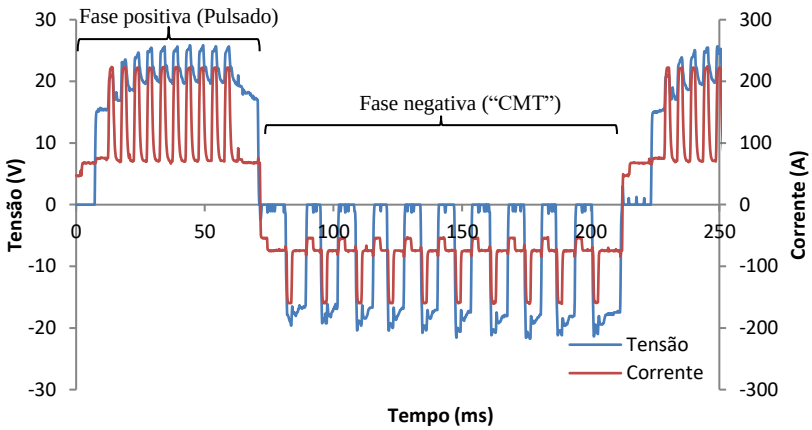


Figura 42 – Oscilogramas de tensão e corrente para o modo CMT Advanced Pulse, utilizando o programa sinérgico de alumínio AlSi5, arame ER4043 de 1,2 mm, na regulagem de Va = 6,0 m/min

A possibilidade de intercalar modos de transferência e/ou polaridade confere ao CMT uma ampliação em sua faixa operacional. Em adição, o equipamento permite também que o usuário configure a quantidade de eventos em cada situação. Para o CMT +P, por exemplo, é possível que sejam regulados o número exato de eventos de pulso de corrente e o número de eventos de curto-circuito que se deseja. Da mesma forma acontece com os modos Advanced e Advanced Pulse. Surge então a possibilidade de regulagem de diferentes níveis de energia para uma mesma quantidade de arame fornecida, alterando a já citada relação entre Va e potência. A inserção de uma sequência de corrente pulsada no CMT (CMT +P) permite que o processo forneça um maior aporte térmico à peça. Do contrário, se o objetivo é reduzir o nível de energia fornecida, tem-se como opção as versões Advanced. Mas apesar de toda essa flexibilidade, a divulgação de trabalhos que utilizam essas modalidades ainda é bastante modesta.

Pang et al. [70] publicaram recentemente um trabalho com a proposta de avaliar as características do arco e da transferência metálica no CMT Pulse. Foram realizados ensaios com diferentes configurações no número de pulsos/curtos, que resultaram em alterações no perfil geométrico do depósito. A medida que foi aumentado o número de pulsos

de corrente, também foi observado um aumento nos valores de penetração e largura do cordão. Os autores destacam ainda algumas observações quanto à forma de onda e os valores de corrente impostos pelo equipamento. Os pontos marcados por círculos na Figura 40 são aqueles que tiveram destaque, ou por divergirem da curva de referência fornecida pelo fabricante (círculos 1 e 2) [67], ou por apresentarem valores que não condizem com a filosofia do CMT (círculo 3). O instante anterior à abertura do arco, identificado pelo círculo 1, destaca a presença de um patamar de corrente mais elevado que aquele inicialmente imposto no curto-circuito. Segundo Pang et Al. [70], a inserção dessa corrente mais alta resulta em um incremento na entrada de calor durante a fase de curto (mas não são citadas vantagens relacionadas a isto). Com a reabertura do arco no início da fase de pulsação, foi destacado pelo círculo 2 que o valor de corrente imposto também apresenta valores maiores do que o indicado na curva de referência, onde a corrente se igualaria ao valor de base da fase de pulsação. A justificativa apresentada é de que uma maior corrente contribui para um maior pré-aquecimento no arame, facilitando a reignição do arco e colaborando com a estabilidade na fase de pulsação. Ressalta-se aqui que, apesar dos autores terem associado o pré-aquecimento provocado pela corrente do círculo 2 com a reignição do arco, o argumento posto seria melhor aplicado como justificativa para o círculo 1, que corresponde ao momento imediatamente anterior à abertura. O círculo 3 destaca o patamar de corrente que seria correspondente à corrente de pulso (I_{boost}) do CMT. A observação feita pelos autores é que, mesmo com essa correlação, o valor aqui imposto é menor do que em uma sequência de eventos de curto-circuito na modalidade CMT. A explicação colocada está no fato de que por estar finalizando uma sequência de eventos de pulsação da corrente, o arame ainda possui uma inércia térmica que ajuda na formação da nova gota, o que permite que seja aplicado um valor de corrente com menor intensidade.

Marques [7], em seu trabalho de mestrado, realizou uma sequência de depósitos com cada uma das versões do CMT, com o objetivo inicial de conhecê-las e verificar o resultado obtido em termos de geometria do cordão em simples depósitos sobre chapa. Em todos os ensaios a regulagem da velocidade de arame na fonte foi mantida a mesma, com os parâmetros originalmente definidos pelo programa sinérgico da fonte. Dentre todas as versões, o depósito feito com o CMT Adv +P foi aquele que forneceu o menor nível de potência e produziu o cordão de mais baixa molhabilidade. A constatação feita contradiz a proposição de que a inserção de uma fase pulsada pode aumentar o aporte térmico em relação

a versão original. A mesma observação foi feita no trabalho de Cong et al. [64].

Para Kazmaier [69], devido à inversão da polaridade, o uso das versões Advanced permite introduzir um menor aporte térmico a peça, com os mesmos resultados em termos de estabilidade que são obtidos com o CMT convencional. Segundo esse autor, as diferentes versões do CMT permitem uma maior flexibilidade na regulagem do calor aportado. Com essas variantes, o relativo aumento na taxa de fusão do arame pode proporcionar, por exemplo, o aumento na capacidade de se preencher juntas com grande espaçamento ("gap bridging"). O fato é que, submetendo uma mesma quantidade de arame a diferentes níveis de energia é possível de se conseguir diferentes condições para a poça metálica e para o material depositado, como obter uma poça mais ou menos fluida, alterar o nível de temperatura atingido na poça e consequentemente modificar o comportamento da viscosidade ou da tensão superficial do material fundido, etc. Nos gráficos apresentados na Figura 43 é possível observar a relação entre velocidade de arame, tensão e corrente para as quatro versões do CMT, em comparação com o MIG Pulsado. Verifica-se nas curvas que, em velocidade de arame maiores que 5 m/min, a versão CMT Advanced Pulse apresenta uma diferença significativa na capacidade de fundir o arame por corrente imposta. Esses dados corroboram os resultados obtidos por Marques [7] e Cong [64] anteriormente citados.

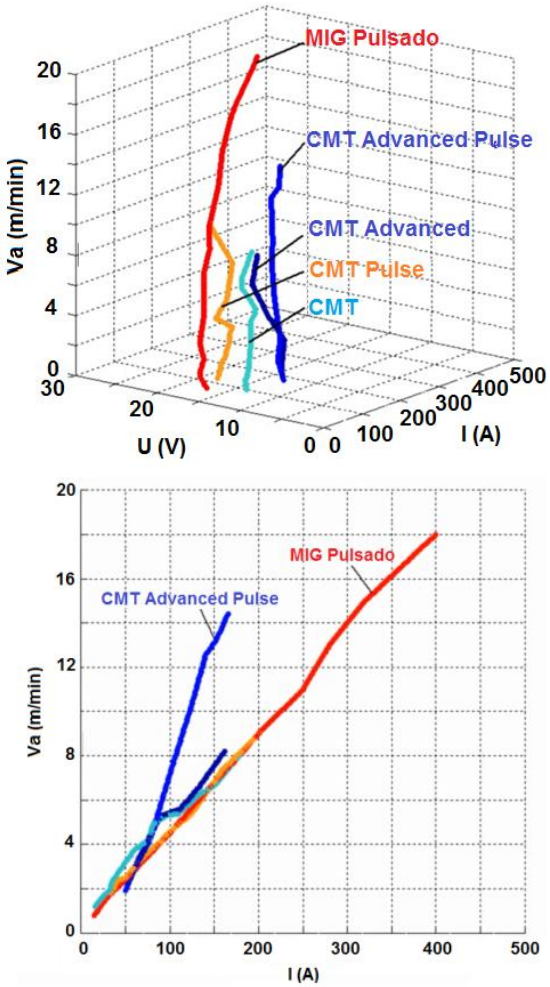


Figura 43 – Gráficos comparativos entre variantes CMT e MIG pulsado [69]

Além das quatro versões até então apresentadas, Brucker et al. [66] citam o modo CMT Synchropuls como sendo uma das variantes do processo. O modo Synchropuls nada mais é do que uma possibilidade de regulagem para que o processo alterne entre dois níveis de energia com base em uma frequência previamente configurada. Pode se fazer aqui uma analogia com o trabalho desenvolvido pelo Labsolda denominado de Pulsado Térmico [15]. A frequência de alternância pode ser regulada em

até 10 Hz e a amplitude máxima de variação de velocidade de arame é de 2 m/min. Visualmente, o resultado obtido com o Synchropuls é um efeito de “escamas” na superfície no cordão, semelhante ao que se consegue com o processo TIG Pulsado. Mas além disso, a alternância entre os dois níveis de energia impostos provoca uma oscilação adicional na poça de soldagem que se propaga pelo metal fundido, o que pode oferecer vantagens quanto ao perfil de penetração e de formação do cordão [66], assim como auxiliar na expulsão dos gases formadores de porosidade. O modo Synchropuls pode ser aplicado em todas as quatro versões do CMT.

3.4. SOBRE O MODO SINÉRGICO DA FONTE FRONIUS

A medida que são desenvolvidas novas técnicas ou estratégias de controle para atuação direta sobre os parâmetros e fenômenos inerentes à soldagem a arco, aumenta consideravelmente o número de configurações possíveis de serem ajustadas no equipamento. Em geral, o sucesso da estabilidade do processo é totalmente dependente de um correto conjunto de parâmetros, o que muitas vezes surge em uma longa etapa de desenvolvimento experimental. A questão toma forma com o surgimento das versões MIG/MAG com controle de corrente, como o caso do modo pulsado. Diversos pesquisadores desenvolveram trabalhos com o objetivo de encontrar uma relação entre os parâmetros possíveis de serem regulados nesta variante, numa forma de simplificar o trabalho por parte do operador. A dificuldade para determinação desse sinergismo entre os parâmetros aumentou com o desenvolvimento das versões que operam em curto-circuito e com o controle de corrente. Nesses casos, além de se ter uma correta relação entre os parâmetros, surge também a necessidade de um monitoramento constante das variáveis elétricas, fundamentais para o controle do processo como, por exemplo, na estratégia adotada para a previsão do instante de reabertura do arco nas versões STT ou CCC [10].

O desenvolvimento das variantes MIG/MAG com alimentação dinâmica de arame agrega outras dificuldades para a definição dos parâmetros de soldagem. Além de estas serem versões com controle de corrente e transferência por curto-circuito, existe neste caso a necessidade de se comandar e controlar os movimentos de avanço e recuo do arame, de maneira sincronizada com os sinais elétricos. O resultado disso é um grande número de variáveis que, de fato, podem inviabilizar o emprego da variante pelo usuário final. Por esse motivo, equipamentos comerciais

disponibilizam os chamados programas ou curvas sinérgicas que facilitam a regulagem dos parâmetros por parte do operador. Por outro lado, a implantação dos programas sinérgicos restringe a liberdade de regulagem nos parâmetros, o que se torna essencial em atividades de pesquisa e desenvolvimento.

Para o CMT existem hoje diversos programas sinérgicos fornecidos pelo fabricante em função do tipo do arame, diâmetro e gás de proteção utilizado. Cada programa é identificado por um código numérico e um nome relacionado ao tipo de material utilizado. Por exemplo, quando for realizada uma soldagem com arame de alumínio ER4043, o programa indicado para esse material tem o nome de identificação AlSi5. Selecionando o diâmetro de 1,2 mm e gás 100% argônio, uma curva CMT atualmente disponível para essa combinação recebe o código de identificação C0876.

O desenvolvimento dos programas sinérgicos permite que o usuário regule o processo, fundamentalmente, com apenas um parâmetro de entrada. Quando a fonte CMT está equipada com o controle RCU5000i [67], o parâmetro de entrada preferencial é dado pela velocidade de arame, sendo todos os outros definidos automaticamente pelo equipamento. No modo de configuração sinérgica o CMT disponibiliza ainda dois parâmetros de correção, que podem assumir diferentes nomenclaturas e funções de acordo com o tipo de material. Por exemplo, na soldagem com arames de aço carbono (ER70S-6), os parâmetros de correção são chamados de “correção de altura do arco” (CAr) e “correção dinâmica” (CD), enquanto que na soldagem de alumínio tem-se o último parâmetro substituído pelo “tempo de hotstart”.

As informações fornecidas pelo manual do fabricante a respeito da atuação dos parâmetros de correção no processo são inexistentes ou pouco explicativas [67], principalmente no que diz respeito ao parâmetro CD, já que sua nomenclatura dá margem para diferentes interpretações. A regulagem da CAr é feita por um valor percentual ajustado entre -30 e +30 %, enquanto que a CD permite valores entre - 5,0 e +5,0.

Segundo Bruckner et al. [66], o parâmetro “correção de altura do arco” ajusta a extensão da coluna de arco plasma. Sua regulagem tem efeito diretamente proporcional ao comprimento do arco, ou seja, maiores valores de CAr representam maiores comprimentos de arco. Para esses autores, o resultado é efeito da alteração no tempo de retorno do arame. Assim, a informação apresentada é de que o arco é reduzido devido ao menor tempo de recuo do arame, o que provoca um aumento na frequência de transferência. No oposto, maiores valores de CAr geram um aumento no tempo de retorno do arame e consequentemente uma menor

frequência de transferência. A necessidade de correção no comprimento do arco é requerida por situações onde, por exemplo, um arco curto pode contribuir com problemas de mordeduras ou onde um arco mais alto pode auxiliar com a molhabilidade do depósito.

Em poucos parágrafos, Brucker et al. [66] também discutem a função para a chamada "correção dinâmica". Segundo os autores, essa correção tem relação com a suavidade da reabertura do arco. Maiores valores de CD correspondem a uma reabertura mais suave, enquanto menores valores produzem uma reabertura mais brusca. O resultado aqui seria efeito da alteração na corrente de curto-circuito, que sofreria ajustes de maneira inversamente proporcional ao valor de CD. O mais baixo valor de CD implicaria em um maior valor para a corrente durante o curto circuito, e isso é ligado pelos autores com uma maior força do arco no momento da sua reignição.

Apesar do usuário utilizar a velocidade de arame como parâmetro de entrada no CMT, com essa variante do processo não se tem a garantia de que a velocidade de arame fornecida pela fonte será a mesma que foi regulada pelo usuário. É comum encontrar trabalhos em que o autor avalia determinado aspecto levando em consideração a velocidade de arame regulada, sem fazer nenhum tipo de ressalva quanto ao uso de um sistema de medição da velocidade de arame. Nesses casos, os resultados e conclusões obtidos podem acabar não refletindo a realidade do depósito, já que a quantidade de material depositado pode ser muito diferente daquela que foi regulada no equipamento.

Além de operar no modo sinérgico, o equipamento permite que o usuário faça edições na curva sinérgica fornecida, em um modo de programação identificado como "otimizar curva sinérgica". A Figura 44 representa o formato de onda base fornecido pelo fabricante para o modo CMT. Os números indicados na figura representam as variáveis que o equipamento permite alteração por parte do usuário, no modo de "otimização". A descrição está contida na Tabela 2. Percebe-se que, mesmo com essa possibilidade de edição no programa, o equipamento ainda restringe o acesso a determinados parâmetros considerados essenciais para o funcionamento do sistema de alimentação dinâmica no MIG/MAG. Alguns estão marcados por letras na mesma figura, como o item (a) que indica a velocidade de arame imposta no retorno; (b) que indica a desaceleração e aceleração do motor durante a reversão do movimento de recuo para o avanço; ou (c) que indica a velocidade de avanço durante o pulso de corrente.

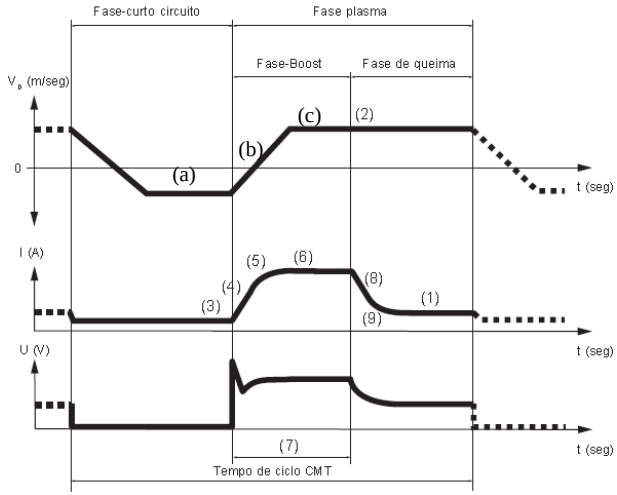


Figura 44 – Oscilogramas estilizados de velocidade de arame, corrente e tensão para o modo CMT [67]

Tabela 2 – Parâmetros editáveis do modo CMT

Item	Identificação	Unidade	Descrição
(1)	I_sc_wait	A	Corrente de base durante a fase de arco
(2)	vd_sc_wait	m/min	Velocidade de avanço de arame, do final da corrente de pulso no arco (I_boost) até o momento do curto-circuito
(3)	I_sc2	A	Corrente no curto-circuito
(4)	d_boostup	A/s(10^{-3})	Taxa linear de subida da corrente no início do pulso (I_boost)
(5)	tau_boostup	s(10^{-3})	Taxa não linear de subida da corrente no início do pulso (I_boost)
(6)	I_boost	A	Corrente de pulso durante a fase de arco
(7)	t_I_boost	s(10^{-3})	Tempo do pulso de corrente na fase de arco
(8)	d_boostdown	A/s(10^{-3})	Taxa linear de descida da corrente no fim do pulso (I_boost)
(9)	tau_boostdown	s(10^{-3})	Taxa não linear de descida da corrente no fim do pulso (I_boost)

O único parâmetro de tempo que o usuário tem acesso direto para regulagem no modo de otimização do sinérgico é o tempo da corrente de pulso. Dessa forma, a frequência de transferência acaba ainda sendo definida pelos valores de velocidade de avanço e recuo que são impostos

pela fonte. Como não se tem acesso total a esses parâmetros, mesmo no modo de otimização da curva característica o usuário não tem maiores liberdades para atuar na mudança da frequência. Em uma análise científica dos eventos de transferência, essa característica torna-se de fato um fator limitante para a definição de ensaios e metodologias de avaliação.

Poder-se-ia ainda citar outros parâmetros ocultos na forma de onda apresentada pela Figura 44. Avaliando oscilogramas obtidos em ensaios com programas sinérgicos para o arame ER70S-6, percebe-se na Figura 45 a presença de um pulso de corrente adicional durante o curto circuito. Não foram encontradas informações do fabricante quanto à função específica desse tipo de forma de onda de corrente.

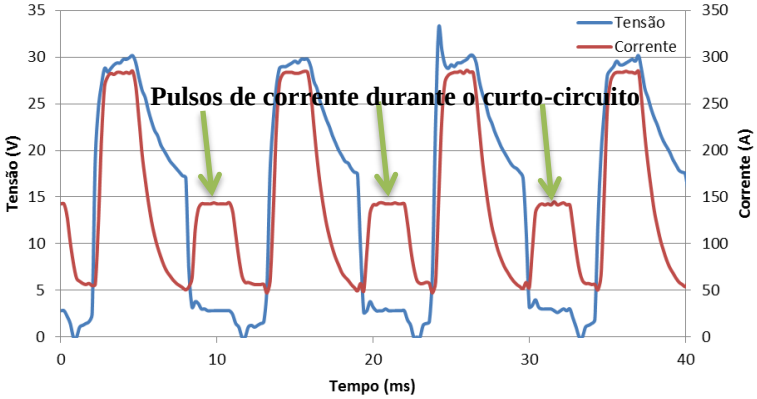


Figura 45 – Oscilograma de tensão e corrente para o MIG/MAG CMT, programa sinérgico do arame ER 70S-6

Para Sun et al. [71], que realizaram um trabalho com CMT na soldagem de titânio, a presença de pulsos de corrente durante o curto-circuito pode fornecer um maior aporte de calor para o material fundido, reduzindo assim o seu coeficiente de tensão superficial e contribuindo com a transferência metálica. Além disso, o pulso de corrente durante o curto provoca um aumento nas forças eletromagnéticas que atuam sobre a ponte metálica, o que também pode contribuir com a transferência devido à estricção da ponte líquida. Sun et al. apresentam ainda algumas conclusões em função de alterações no parâmetro de correção dinâmica. Segundo eles, a regulagem desse parâmetro tem atuação sobre a resposta dinâmica da fonte, com relação a taxa de subida da corrente e da tensão,

o que é divergente da informação colocada por Brucker et al [66] e dos resultados obtidos no presente trabalho.

Quando se opera o equipamento no modo de edição do sinérgico é possível arquitetar a maneira que o programa está conceitualmente desenhado. Em resumo, o programa sinérgico da fonte CMT tem como base uma tabela de dados previamente definidos pelo fabricante, onde estão determinados os parâmetros aplicáveis ao CMT dentro da faixa de potência disponível para cada combinação de arame, gás e diâmetro. A Tabela 3 mostra como exemplo parte dos parâmetros retirados do programa sinérgico AlSi5 para arame de 1,2 mm e gás argônio, que permite uma regulagem de velocidade de arame entre 1,2 e 8,1 m/min. A variação dos parâmetros da tabela para toda a faixa não pode ser representada de forma linear entre os valores extremos de regulagem. Para tanto, o programa permite a marcação de pontos intermediários. Assim, quando o valor regulado pelo operador estiver localizado entre dois pontos, os parâmetros são então configurados com base em uma regressão linear entre os pontos vizinhos.

Tabela 3 – Parâmetros definidos para o sinérgico AlSi5 no modo de "otimização"

Parâmetros	**Ponto 1**	**Ponto 2**	**...**	**Ponto 5**	**Ponto 6**	**Ponto 7**	**...**	**Ponto 10**	**Ponto 11**
Valores de Referência									
Alimentador (m/min)	1,2	1,7	...	4,2	4,9	5,3	...	6,7	8,1
Valor ref corrente (A)	16	26	...	76	81	96	...	152	180
Valor ref espessura (mm)	0,4	0,6	...	1,2	1,5	1,7	...	4	5
valor ref Tensão (V)	10	10,7	...	12,3	12,5	12,7	...	16,8	17
Parâmetros CMT									
Is_sc_wait (A)	15	15	...	70	70	70	...	70	70
Vd_sc_wait (m/min)	20	20	...	25	35	40	...	45	45
I_sc2 (A)	40	40	...	40	40	40	...	40	40
d_boostup (A/ms)	1000	1000	...	300	300	300	...	300	300
tau_boostup (ms)	0,1	0,1	...	0,1	0,1	0,1	...	0,6	0,6
I_boost (A)	15	30	...	150	150	120	...	200	250
t_I_boost (m/s)	50	15	...	2	5	14	...	30	30
d_boostdown (A/ms)	1000	1000	...	300	300	300	...	300	300
tau_boostdown (ms)	-	-	...	-	-	-	...	-	-

A velocidade de arame selecionada pelo operador na interface de programação aponta para uma coluna da tabela (ou para valores calculados entre os pontos) que irão basicamente definir os valores de corrente impostos e os valores de avanço e recuo de arame. O valor de corrente em cada uma das fases (arco e curto) e patamares (pulso e base) permanece inalterado para uma determinada regulagem de Va. Por esse motivo, a quantidade de arame que pode ser fundido sofre constante alteração durante a soldagem com o CMT, fazendo com que a própria regulagem feita pelo usuário não seja obedecida. Como o valor de corrente imposta é mantido pela fonte, a alteração na DBCP provoca diferentes contribuições do efeito Joule para a fusão do arame. Sartori [62] verificou a situação em depósitos de aço carbono, com a realização de ensaios em que a DBCP foi alterada entre 10 e 25 mm. A Figura 46 mostra o resultado obtido, onde percebe-se claramente que a velocidade de arame medida (Va real) é diferente da que foi regulada na máquina (Va imposta) devido aos diferentes valores de DBCP.

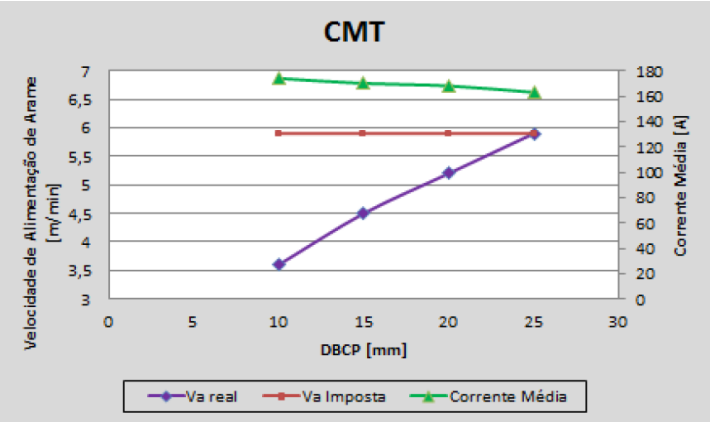


Figura 46 – Exemplo da variação da Va fornecida pelo cabeçote do CMT em função da alteração na DBCP, para uma Va regulada em 5,9 m/min [62]

4. EQUIPAMENTOS, MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são descritos os equipamentos, materiais e metodologias de ensaios realizados ao longo deste trabalho. Dada a natureza exploratória de grande parte dos ensaios, as atividades não foram realizadas em uma única bancada, como está sendo apresentado na sequência.

4.1. EQUIPAMENTOS

4.1.1. Fontes de soldagem

O trabalho foi realizado, principalmente, com duas fontes de soldagem. A versão MIG/MAG CMT foi estudada com uma fonte Fronius modelo CMT Advanced 4000R equipada com a interface de configuração modelo RCU5000i [67].

Os trabalhos referentes ao desenvolvimento do protótipo para soldagem MIG/MAG com alimentação dinâmica foram feitos com a fonte de soldagem multiprocesso IMC modelo Digiplus A7, com capacidade de corrente de 600 A.

a) b)

Figura 47 – Fontes de Soldagem utilizadas; a) CMT Advanced 4000R; b) IMC Digiplus A7 600 A

4.1.2. Dispositivos manipuladores

Como equipamentos manipuladores para soldagem, operando tanto na configuração conduzindo a tocha ou conduzindo a peça, foi utilizado no trabalho um robô antropomórfico Motoman, modelo UP6 (Figura 48 – a), e um manipulador cartesiano SPS modelo Tartílope V2 (Figura 48 – b).

a) b)

Figura 48 – Dispositivos manipuladores; a) Robô Motoman UP6; b)Tartílope V2

4.1.3. Equipamentos de medição e monitoramento

A necessidade de medição e monitoramento dos ensaios de soldagem é evidente em um trabalho que propõe a análise dos eventos. Sendo assim, para realizar a aquisição dos dados elétricos do processo, como a tensão, corrente e também a velocidade de alimentação de arame, utilizou-se o sistema de aquisição de dados portátil (SAP-4) [72], com taxa de aquisição de 5 kHz. O equipamento é mostrado na Figura 49.

Figura 49 – Sistema de aquisição de dados dedicado à soldagem – SAP-4

Com a necessidade de se avaliar mais diretamente os momentos de transferência metálica e os movimentos de avanço e recuo do arame para as frequências utilizadas no MIG/MAG, utilizou-se ainda do recurso da filmagem em alta velocidade. Os principais equipamentos utilizados para essa finalidade estão listados na Tabela 4. A câmera de filmagem em alta velocidade é do fabricante IDT Vision, modelo Y4S2. Esse equipamento possui também um módulo para aquisição de dados (MotionPro DAS – Data Acquisition System), com taxa de aquisição configurável e capacidade de até 16 sinais de entrada em tensão analógica (-10 a +10 V). Para compatibilizar os sinais de tensão e corrente de soldagem com os níveis suportados por esse módulo, foi usado o instrumento chamado TC1 [73], fabricado pelo LABSOLDA/IMC Soldagem, que já dispõe de saídas isoladas com essa finalidade de integração.

Uma das principais dificuldades relacionadas com a filmagem em alta velocidade da transferência metálica na soldagem MIG/MAG 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. Trata-se de um laser classe 4, com comprimento de onda de 810 ± 10 nm. 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.

Tabela 4 - Lista de componentes integrantes em sistema de monitoramento por imagens de alta velocidade e aquisição de dados integrado

Equipamento	Descrição
Câmera	**IDT, Y4S2** Taxa de aquisição: máx. 4500 quadros por segundo para a máx. resolução de 1016 x 1016 px Tempo de gravação na maior resolução: 1.37 s equivalente a 6201 Frames Memória: 8Gb de memória interna
Lente	**Canon, Macro EF 180 mm L USM** - Diâmetro: 72 mm - Abertura: f/3.5 - Ampliação máxima de 1x
Filtro ótico	**Edmund Optics, 810 ± 10 nm** Passa banda 810 nm (half width 10 nm) Diâmetro 50 mm
Sistema de iluminação LASER	**Cavitar, CAVILUX HF:** LASER classe 4 Potência de pulso 500 W ± 10% Tempo do pulso < 50 ns Comprimento de onda 810 ± 10 nm
Sistema de Aquisição de Dados	**IDT, DAS MotionPro** **Entradas analógicas** Número de canais: 16 Resolução dos conversores: 16 bits Taxa de aquisição máxima: 500 kHz Tensão de entrada máxima: ±10 V **Saídas analógicas** Número de canais: 4 Resolução dos conversores: 16 bits Taxa de aquisição máxima: 500 kHz Tensão de saída máxima: ±10 V

TC1	**Medidor de tensão e corrente** Faixa de medição: de tensão: ±60 V de corrente: sensor de 500 A Saídas analógicas: ±10 V para os valores máximos de medição
Notebook	**Dell, XPS 15-L502x** Processador: Intel Core i5-2410M 2.3 GHz Placa gráfica: NVIDIA GT 540M - 1 Gb Memória RAM: 6 Gb Tela: 15.6 polegadas Full HD 16:9 HD: SSD 256 Gb HD 2: Sata 1 Tb

4.1.4. Sistema de acionamento

Durante a etapa de desenvolvimento do protótipo para a realização da soldagem MIG/MAG com alimentação dinâmica, foram avaliadas três diferentes tecnologias de acionamento: motor CC, motor de passo e servo motor CA. O motor CC utilizado foi o modelo GM8224S017, do fabricante Pittman, com o controle e acionamento feito por meio do driver de potência RUTEX modelo R2010. O motor de passo utilizado foi o modelo KTC-HT23-401, do fabricante Kalatec, com o driver de potência modelo STR8 da empresa Applied Motion. Por fim, o conjunto de servo driver e servomotor CA série Minas A4 do fabricante Panasonic foi testado em duas potências nominais 200 W, modelo MSMD022P1T, e de 100 W, modelo MSMD012P1T. A Figura 50 mostra os modelos de motores avaliados em primeira etapa de testes, com respectivos drivers apresentados na Figura 51.

A **B** **C**

Figura 50 – Motores utilizados em ensaio de movimentação; A – Motor CC; B – Motor de passo; C – Servomotor AC

A **B** **C**

Figura 51 – Drivers utilizados em ensaio de movimentação; A – Rutex R2010; B – Applied Motion STR8; C – Panasonic Minas A4 series

Os requisitos de inversão de movimento requeridos pelo sistema MIG/MAG AD provocam um demasiado esforço no motor, o que pode acabar comprometendo sua vida útil. Nesses casos, o motivo da falha poderia ser mecânico, com a falha dos rolamentos os mancais de apoio, ou elétrico, causado pelo aquecimento demasiado das bobinas e pelo consequente comprometimento do seu isolamento elétrico. O presente trabalho não tem a prerrogativa de avaliar as características técnicas do motor que possibilitem uma maior durabilidade sob as condições que serão submetidos. Até porque aplicações dessa natureza não são usualmente encontradas, o que torna a seleção de motores comerciais para utilização em trabalhos desse tipo uma tarefa complexa. O intuito é que os testes realizados no decorrer do desenvolvimento também sirvam como forma de avaliação do funcionamento do motor. Resumidamente, é desejável que o modelo de motor utilizado no desenvolvimento do protótipo seja pequeno o suficiente para compor uma futura montagem em uma tocha manual, mas deve ainda oferecer o torque necessário para tracionar o arame e ter a capacidade de inverter o sentido de rotação no menor tempo possível. Sendo assim, tendo em vista os resultados obtidos com o acionamento do tipo servo CA, buscou-se no mercado modelos de motores desse tipo de tecnologia que oferecessem menores valores para o momento de inércia que o modelo testado da Panasonic (que já se tinha

disponível no Labsolda para início dos testes). O equipamento fornecido pela empresa Kollmorgen apresentou características que justificaram a sua implementação no protótipo desenvolvido para a verificação do seu desempenho. O motor utilizado foi o AKM11B-AKMNC-00, com o driver do mesmo fabricante modelo AKDP00306NBCC-0. Apesar deste modelo possuir um torque nominal menor que o modelo da Panasonic testado (0,18 Nm contra 0,32 Nm), o Kollmorgen possuía um momento de inércia de 0,017 kg.cm², cerca de 3 vezes menor que o modelo Panasonic, que era de 0,054 kg.cm².

Figura 52 – Conjunto servomotor Kollmorgen Series AKM e servo driver AKD

4.2. MATERIAIS

O desenvolvimento das atividades deste trabalho foi conduzido fundamentalmente em ensaios de soldagem com ligas de alumínio, aço carbono e aço inoxidável. A variedade de materiais é justificada pela necessidade de exploração de funções e parâmetros associados com a versão MIG/MAG CMT, tendo em vista a diferença nos programas sinérgicos e na atuação dos parâmetros de correção sobre a solda. Também foram aplicadas ligas de alumínio e aço carbono nos ensaios de avaliação do protótipo desenvolvido, sob a justificativa de avaliar o comportamento para pelo menos dois materiais distintos.

Para ligas de alumínio, foram realizados trabalhos com arames do tipo ER4043 e ER5183, ambos com 1,2 mm de diâmetro. As chapas utilizadas foram da liga 5083 na espessura de 6 mm e da liga 1000 para espessuras menores.

Para realização de ensaios com aço carbono foi utilizado o arame ER70S-6 com 1,2 de diâmetro e chapas de aço comum 1020. Nos ensaios com aço inoxidável, empregou-se o arame 309LSi com 1,0 mm de diâmetro.

Outras informações que se fazem relevantes aos materiais utilizados são colocadas em conjunto com a metodologia de ensaios no item a seguir.

4.3. METODOLOGIA DE ENSAIOS E DESENVOLVIMENTOS

A metodologia de ensaios e desenvolvimentos do presente trabalho foi concentrada em dois grupos. O primeiro relaciona as atividades de avaliação acerca da modalidade MIG/MAG CMT e dos efeitos associados com a movimentação dinâmica do arame na sua aplicação. O segundo grupo trata das atividades de desenvolvimento que culminaram na criação de um sistema para realização de soldagem MIG/MAG com alimentação dinâmica do arame. A Figura 53 mostra uma representação esquemática das etapas em que o trabalho foi delineado.

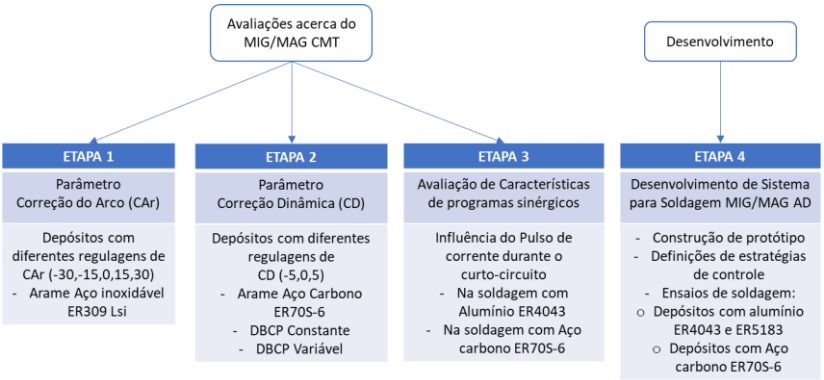


Figura 53 – Representação esquemática de etapas de ensaios e desenvolvimento

Cada uma das etapas apresentadas na figura acima será descrita em detalhes nos tópicos seguintes. Adicionalmente, tendo em vista o potencial desenvolvido ao longo do trabalho no que tange às técnicas para filmagem em alta velocidade, e ressaltando a importância do uso dessa ferramenta para as análises feitas no presente contexto, inicia-se a

descrição das metodologias com um resumo descritivo dos procedimentos associados com essa técnica.

4.3.1. Metodologia para aquisição de imagens em alta velocidade

O campo para utilização da filmagem em alta velocidade é muito vasto e sua aplicação pode ser encontrada em diversos setores e áreas, desde a análises de processos industriais, em pesquisas científicas, e até mesmo em eventos desportivos ou esportes de alto desempenho. Em soldagem, a filmagem em alta velocidade tem se mostrado uma ferramenta de extrema importância para o monitoramento e avaliação dos mais variados fenômenos associados com a física do arco e da transferência metálica. No presente trabalho, além de possibilitar esse monitoramento, a filmagem se mostrou essencial para o desenvolvimento do sistema com alimentação dinâmica de arame. Sendo assim, o presente tópico pretende abordar de maneira simplificada os principais métodos utilizados para a realização das filmagens em alta velocidade, cujos resultados estão sendo apresentados ao longo deste trabalho.

Conforme citado anteriormente, a principal dificuldade relacionada com o monitoramento da soldagem em alta velocidade está na grande concentração de luz gerada na região de interesse. Em situações onde se pretende registrar uma transferência metálica por curto-circuito a dificuldade é ainda aumentada, uma vez que se tem momentos intercalados de arco elétrico e curto-circuito, configurando situações de luminosidade completamente distintas. A estratégia utilizada neste trabalho consistiu no uso de um sistema auxiliar de iluminação baseado em laser direcionado para a região de interesse. Com comprimento de onda definido em 810 nm, o laser se torna invisível para o homem, mas ainda assim é capaz de sensibilizar o sensor da câmera. Um filtro passa banda (810 ±10 nm) é então instalado à frente da lente, permitindo que somente uma faixa de luz próxima àquela emitida pelo laser chegue até a câmera. Sendo assim, grande parte da luminosidade gerada pelo arco acaba sendo atenuada pelo filtro e, nos momentos de curto circuito, o cenário está totalmente iluminado pelo próprio laser.

Com o objetivo de analisar os diferentes fenômenos e situações, durante o todo o período de ensaios do projeto, foram realizadas diversas seções de filmagem. Dependendo da época do trabalho e da necessidade de monitoramento, a configuração das bancadas era totalmente adaptada.

Assim, em alguns casos, um robô antropomórfico foi utilizado para deslocar a tocha de soldagem sobre a peça (Figura 54). Em outros, foi montada uma bancada em que a tocha de soldagem permanecia fixa em relação à câmera e um manipulador automático se encarregava de deslocar a peça (Figura 55). A disposição dos equipamentos de filmagem em cada um dos casos tinha que se adaptar às necessidades do ensaio e as características da bancada.

Figura 54 – Layout da bancada utilizando robô antropomórfico para mover a tocha

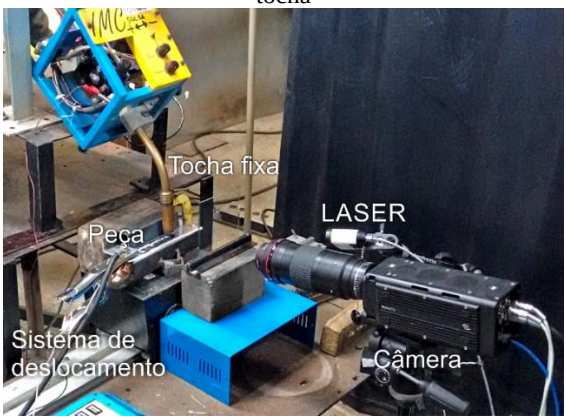


Figura 55 – Layout da bancada utilizando um manipulador para deslocar a peça enquanto a tocha permanece fixa

O resultado alcançado nas filmagens tem uma estreita relação com a disposição dos componentes. Nesse sentido, foi observado que pequenas variações nos ângulos e distâncias entre os elementos básicos produzia grandes alterações nas imagens, chegando ao ponto de

inviabilizar a filmagem. Por elementos básicos, considera-se aqui a câmera de filmagem em alta velocidade, a fonte de iluminação laser e o objeto de interesse que, geralmente, se tratava do arame e da poça de fusão.

Para determinar as melhores condições de filmagem foram realizados testes preliminares com os equipamentos em diferentes disposições, alterando experimentalmente o posicionamento dos elementos básicos. Isso implicou em variações nos ângulos de incidência do laser e da câmera em relação ao objeto, ajustes finos do foco da câmera e do laser, sempre controlando os reflexos do próprio laser provocados pelos objetos dentro da área de interesse. A Figura 56 mostra de maneira esquemática a disposição dos componentes.

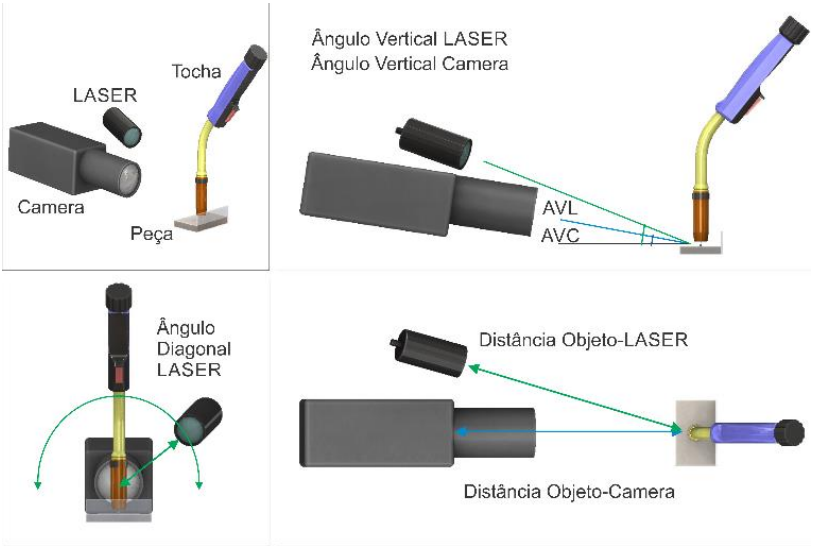


Figura 56 - Organização dos componentes básicos e as principais medidas que foram testadas para determinar as melhores condições de filmagem.

Na lente macro instalada na câmera foram alteradas as configurações de abertura do diafragma. A regulagem feita variou entre f/16 e f/32. Além disso, para evitar que eventuais respingos de solda atingissem componentes como câmera, lente, filtro e laser, foi utilizado como dispositivo de proteção um vidro com 3 mm de espessura fixado próximo à tocha de soldagem. A distância entre a câmera (sensor) e o objeto foi de, em média, 470 mm. Já o espaçamento entre o laser (lente divergente) e o objeto variou entre 360 a 490 mm. O posicionamento

relativo entre os componentes básicos pode ser visto pelo exemplo demonstrado na Figura 57.

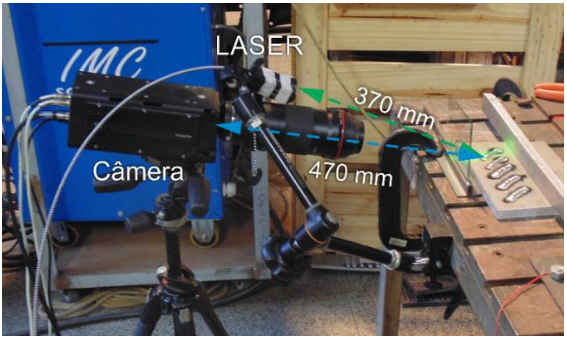


Figura 57 – Disposição básica dos componentes de filmagem durante monitoramento de transferência metálica em soldagem CMT

Além de toda a definição na disposição física dos componentes de filmagem na bancada de ensaios, cabe ressaltar as configurações básicas definidas no software da câmera (Motion Studio PRO). De modo geral, a área de visualização foi configurada com 1016 x 916 pixels e as taxas de aquisição ficaram entre 4166 e 5000 Hz, que representam a quantidade de quadros ou frames registradas por segundo (qps). Ainda, pode se citar os tempos de exposição utilizados, que variaram entre 4 µs e 10 µs. Esses valores de frequência e tempo de exposição devem estar em concordância com os parâmetros configurados para frequência e tempo de pulso do laser, o que é ajustado no software específico do equipamento CAVILUX. O sincronismo entre a pulsação do laser e a aquisição de imagens da câmera é feito por meio de um sinal de *trigger* conectado entre os dois equipamentos.

Quando realizada a filmagem de alta velocidade, a aquisição de dados sincronizada com o vídeo pôde ser feita com o módulo externo *Data Acquisition System* (DAS). Neste caso, para sincronismo entre os dados e imagens também é necessário utilizar uma conexão física (*trigger*) entre a câmera e o DAS. A taxa de aquisição de imagens passa a ser dependente da frequência de aquisição de dados. Por exemplo, para se ter uma frequência de imagem de 5000 Hz, o módulo DAS pode ser configurado com taxa de amostragem de 50 kHz e, a cada 10 dados de aquisição a câmera registra um frame, o que resulta nos 5000 Hz de imagem.

Por fim, outro fator determinante para a melhoria na qualidade dos vídeos apresentados está na capacidade de realizar o pós-processamento das imagens. Após a filmagem, utilizando-se do software para edição de vídeos Premiere da empresa Adobe, puderam ser aplicados diferentes filtros digitais para aumento da nitidez, controle de luzes e sombras, ajustes nas cores entre outros.

4.3.2. Etapa 1 – Avaliações acerca do parâmetro "Correção do arco" no MIG/MAG CMT

Com o objetivo de avaliar qual a influência do parâmetro "correção do arco" (CAr) para a variante CMT, foram realizados ensaios experimentais do tipo depósito sobre chapa com diferentes regulagens desse parâmetro. A condição inicialmente definida era de que todos os outros parâmetros de soldagem regulados, seja na fonte, no manipulador ou aqueles definidos pelo usuário, como a DBCP e os ângulos da tocha, fossem mantidos constantes em todos os depósitos. Nesses ensaios a soldagem foi realizada com arame de aço inoxidável 309LSi, com 1,0 mm de diâmetro e, como material de base, chapas de aço carbono SAE1020, de 6 mm de espessura. A tocha de soldagem foi conduzida pelo manipulador Tartílope V2 e a peça fixada à bancada de soldagem. Para se ter uma ampla visão da resposta do equipamento em toda a faixa de valores possíveis de serem configurados, foram definidos cinco valores de CAr: -30%, -15%, 0, 15% e 30%, que refletem em pelo menos cinco ensaios em condições diferentes. A Tabela 5 apresenta os demais parâmetros regulados. Em todos os depósitos foi feita a aquisição dos dados de tensão, corrente e velocidade de arame média com o auxílio da maleta SAP.

Tabela 5 – Definição de parâmetros para ensaios de avaliação do parâmetro correção do arco

Parâmetros Regulados na Fonte de soldagem	
Versão do Processo	CMT
Programa Sinérgico	CrNi 19 9, Ar+2,5%CO_2, Ø 1,0 mm
Va (m/min)	5
$I_{referência}$ (A)	98
$U_{referência}$ (V)	12,8
Correção Arco	-30, -15, 0, 15, 30
Correção Dinâmica	0
Parâmetros de Movimentação	
Vs (cm/min)	20
Tipo de tecimento	Linear
Amplitude (mm)	-
Frequência (Hz)	-
Outros Parâmetros	
DBCP (mm)	12
Arame	309LSi, Ø1,0 mm
Gás	Ar + 2% O_2
Vazão de gás (l/min)	15

Em seguida, como forma de avaliar e medir as velocidades de arame impostas na tocha, ou seja, as velocidades diretamente relacionadas com o movimento de avanço e recuo do arame (movimentação dinâmica), utilizou-se o recurso da filmagem em alta velocidade. A filmagem foi feita com uma taxa de aquisição de 2500 Hz. Em sincronismo com as imagens realizou-se também a aquisição dos sinais de tensão e corrente. Esse fato permite avaliar os instantes onde ocorrem as inversões de movimento ou alterações na velocidade de avanço ou recuo. Para facilitar a filmagem, nessa nova sequência de ensaios a tocha de soldagem foi mantida fixa e o Tartílope se encarregava de deslocar a peça em movimento linear (sem tecimento). As demais configurações de soldagem foram mantidas as mesmas apresentadas na Tabela 5.

A estratégia adotada foi a de filmar os roletes tracionadores de arame posicionados na tocha e, posteriormente, extrair do vídeo os instantes de máximo avanço e recuo do arame, representados pela parada do rolete. De posse das imagens é possível medir os ângulos de rotação desse componente em um software de tratamento de imagens. A Figura 58 exemplifica uma sequência de medição. Tendo a informação do diâmetro do rolete, calculou-se o deslocamento de arame com base na equação (13) que representa o comprimento de arco correspondente ao ângulo do movimento.

a) b) c)

Figura 58 – Sequência de medição de ângulo em monitoramento de rolete da tocha CMT; a) ponto extremo de recuo; b) ponto extremo de avanço; c) ângulo correspondente ao avanço de arame

$$l = \frac{\alpha \cdot \pi \cdot r}{180} \tag{13}$$

Em adição, com a informação de tempo registrada em cada frame do movimento adquirido com a câmera, foi calculada a velocidade média de avanço e recuo do arame utilizando a equação (14). Obviamente a utilização dessa equação resulta no cálculo de um valor médio da velocidade, tendo em vista que não estão sendo considerados os tempos de aceleração e desaceleração do rolete. Todavia, para a avaliação que o ensaio está sendo proposto, considerou-se que aproximação não implicaria em distorções nas conclusões obtidas.

$$v_m = \frac{l}{\Delta t} \tag{14}$$

4.3.3. Etapa 2 – Avaliações acerca do parâmetro "Correção dinâmica"

Com o objetivo de avaliar qual a influência do parâmetro "correção dinâmica" para o CMT foram propostos ensaios experimentais do tipo depósito sobre chapa, sem a premissa de avaliação do resultado dos depósitos em termos de geometria do cordão. A única preocupação neste sentido era de que o cordão tivesse uma continuidade pois, do contrário, as instabilidades associadas ao arco poderiam interferir na análise dos resultados.

O trabalho foi conduzido com depósitos de aço carbono, com o arame ER70S-6 e diâmetro de 1,2 mm, em chapas de 6 mm de espessura. Como dispositivo manipulador foi aqui utilizado o robô Motoman UP6.

O parâmetro de análise, correção dinâmica, foi avaliado nas regulagens -5, 0 e +5. Em uma primeira instância, o robô foi configurado para deslocar a tocha com um movimento linear, sem nenhum tipo de tecimento. Para essa condição, foram feitas as aquisições dos sinais de tensão, corrente e velocidade média de arame. Todos os outros parâmetros envolvidos nesses ensaios foram mantidos constantes, de acordo com a Tabela 6.

Tabela 6 - Definição de parâmetros para ensaios de avaliação do parâmetro correção dinâmica

Parâmetros Regulados na Fonte de soldagem	
Versão do Processo	CMT
Programa Sinérgico	G3Si, Ar+18%CO_2, Ø 1,2 mm
Va (m/min)	4
$I_{referência}$ (A)	139
$U_{referência}$ (V)	14,3
Correção Arco	0
Correção Dinâmica	-5, 0, +5
Parâmetros de Movimentação	
Vs (cm/min)	50
Tipo de tecimento	Linear
Outros Parâmetros	
DBCP (mm)	15
Arame	ER70S-6, Ø1,2 mm
Gás	Ar + 25% CO_2
Vazão de gás (l/min)	15

Em seguida, como forma de avaliar também se o parâmetro tem atuação em termos de velocidade de avanço e recuo do arame, foram realizados ensaios visando o monitoramento dos roletes tracionadores instalados na tocha de soldagem, a exemplo do que foi apresentado no item 4.3.2. O ensaio foi repetido para as mesmas três configurações de CD (CD = - 5; CD = 0 e CD = +5). Como forma de provocar uma atuação no controle de correção do comprimento de arco, a movimentação relativa entre a tocha e peça foi feita com variação cíclica da DBCP. Para isso, configurou-se um movimento de tecimento no robô utilizando o plano XZ, da mesma forma como demonstrado na Figura 32. A amplitude do movimento foi de 6 mm, para uma frequência de 2 Hz. A velocidade de soldagem foi mantida em 50 cm/min. De modo a viabilizar a filmagem, optou-se ainda por manter a tocha fixa e movimentar a peça com o auxílio do robô Motoman.

4.3.4. Etapa 3 – Avaliações acerca de características de programas sinérgicos do CMT

Os diferentes tipos de materiais, diâmetros de arame ou gás de proteção exigem parâmetros de soldagem diferenciados para se obter o melhor resultado em termos de estabilidade do processo. Isso já é observado desde fontes convencionais de tensão onde, para diferentes configurações de arame e gás, a alteração em parâmetros elétricos como a taxa de subida da corrente, contribui para melhoria significativa dos resultados da soldagem [74]. Para a versão CMT, o fabricante disponibiliza as chamadas curvas sinérgicas que configuram automaticamente a fonte, fornecendo os parâmetros nas condições de melhor estabilidade por ele definida. Com base em avaliações prévias das formas de onda impostas por essas curvas sinérgicas, surgem questões passíveis de serem avaliadas. É o caso, por exemplo, da observação feita para a existência de um pulso de corrente durante o início do curto circuito em alguns programas, como do aço carbono. Outros materiais, como o alumínio, não apresentam tal característica em sua curva sinérgica do CMT.

Como forma de avaliar os efeitos da inserção do pulso de corrente durante o curto-circuito, foram realizados ensaios de soldagem com arames de aço carbono e alumínio, editando o programa da fonte Fronius para realizar a soldagem com e sem pulso de corrente para os dois arames. Como essa configuração não é uma opção *default* da fonte, a metodologia adotada foi adaptar o programa de alumínio para soldar com aço sem o pulso de corrente, e adaptar o programa de aço para soldar com arame de alumínio e com pulso de corrente.

Para isso, foi necessário operar com a fonte na opção denominada “otimizar curva sinérgica”. Acessando esse menu é possível verificar os valores atribuídos pelo fabricante para os parâmetros reguláveis das curvas de corrente e velocidade de arame. A Tabela 7 apresenta os valores originalmente disponíveis para a velocidade de arame de 5 m/min dos sinérgicos de aço carbono (G3Si1) e alumínio (AlSi5) . A metodologia proposta foi de se regular os valores de um programa no outro, como forma de investigar a influência do uso do pulso de corrente em ambos os casos.

Tabela 7 - Parâmetros das curvas sinérgicas de alumínio e aço carbono para a velocidade de arame de 5 m/min

Parâmetro		**Sinérgico do alumínio**	**Sinérgico do aço**
Parâmetros de ignição	Slaghammer (1 ON / 0 OFF)	n/a	1
	vd_ignition (m/min)	0	n/a
	I_ignition (A)	60	250
	t_ignition (ms)	15	20
	U_hotstart (V)	20	n/a
	t_hotstart (ms)	0	n/a
Parâmetros CMT	I_sc_wait (A)	70	49,5
	Vd_sc_wait (m/min)	36,24	25
	I_sc2 (A)	40	80
	d_boostup (A/ms)	300	500
	tau_boostup (ms)	0,1	0,1
	I_boost (A)	142,6	300
	t_I_boost (m/s)	7,24	2,5
	d_boostdown (A/ms)	300	300
	tau_boostdown (ms)	n/a	1
Final de soldagem	I_drop_melt (A)	3	100
	t_burnback (ms)	0	0
Valores de Referência	Valor ref Corrente (A)	84,7	165
	Valor ref espessura (mm)	1,5	1,4
	Valor ref Tensão (V)	12,54	15,2
	Alimentador (m/min)	5	5

Dessa forma, foram realizados depósitos com arame de aço ER70S-6 em chapas de aço SAE 1020 e arame de alumínio ER4043 em chapas da liga 5083, sendo os dois de 1,2 mm de diâmetro. Nesses ensaios a tocha foi conduzida pelo robô Motoman UP6, com DBCP mantida em 15 mm e velocidade de soldagem em 40 cm/min. Para os dois tipos de

arame, os parâmetros de referência foram os definidos pela fonte em uma velocidade de arame regulada em 5 m/min. Em todos os ensaios foram feitas a aquisição dos dados de tensão, corrente e velocidade de arame. Para a avaliação dos efeitos do pulso de corrente durante o curto, utilizou-se ainda o recurso da filmagem de alta velocidade.

4.3.5. Etapa 4 – Desenvolvimento de sistema para soldagem MIG/MAG AD

O desenvolvimento do sistema para soldagem MIG/MAG com alimentação dinâmica de arame aqui apresentado é, sobretudo, resultado de um trabalho de pesquisa e levantamento de conhecimento sobre as características técnicas e científicas das diferentes versões já existentes, especialmente, o CMT. Adicionado a isto e, para auxiliar na metodologia de desenvolvimento das atividades, o trabalho pode ser dividido em duas fases principais. A primeira delas compreende o desenvolvimento do dispositivo eletromecânico para atuação sobre o movimento de avanço e recuo do arame. Fazem parte dessa fase os testes realizados com diferentes tipos de motores, com o objetivo de avaliar qual o modelo que melhor se adequaria aos requisitos de frequência requeridos pelo MIG/MAG. Também está inclusa a construção dos protótipos utilizados para a realização dos ensaios de soldagem. A segunda fase se constitui da definição das estratégias de controle e dos ensaios de soldagem que ocorreram concomitantemente.

4.3.5.1. Desenvolvimento do protótipo

A arquitetura básica do sistema para soldagem MIG/MAG AD é composta por: uma unidade de alimentação de arame capaz de promover o movimento de avanço e recuo, uma tocha, uma unidade de potência para solda e uma unidade de controle do processo, assim como demostrado no diagrama esquemático da Figura 59. O dispositivo Tracionador secundário tem como função desenrolar o arame do rolo e disponibilizar para o dispositivo responsável pela movimentação dinâmica. Neste trabalho não houve desenvolvimento de uma solução para o acionamento integrado dos dois motores (alimentação dinâmica e tracionador secundário). O arame era simplesmente disponibilizado por meio de um conduíte, com uma velocidade fixa que poderia ser regulada manualmente durante a execução dos ensaios de soldagem. As unidades de potência e

de controle compõem a fonte de soldagem utilizada, modelo Digiplus da IMC, com capacidade para 600 A (Figura 47 – B). Esse equipamento dispõe de uma placa controladora baseada em um microcontrolador ARM de 32 bits, cujo software foi disponibilizado pelo fabricante para as atividades de desenvolvimento deste trabalho.

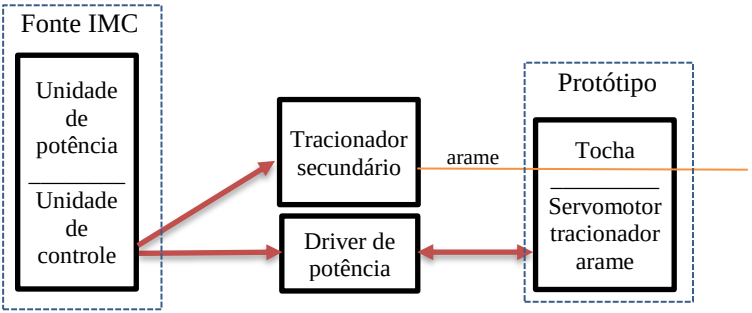


Figura 59 – Diagrama básico do sistema de controle para soldagem MIG/MAG AD

O principal dispositivo externo à fonte acionado no sistema MIG/MAG AD é o driver de potência do motor responsável pelo avanço e recuo do arame. Para essa integração, optou-se por utilizar o comando do tipo passo e direção (*step/dir*). Com os sinais de *step* e *dir* o driver recebe as referências de posição, velocidade e direção para o motor. O sinal de *step* é caraterizado por um trem de pulsos com frequência definida pelo controle. Cada pulso recebido pelo driver corresponde a um passo do motor, de modo análogo ao que se tem no comando de motores de passo. Em adição, quanto maior frequência dos pulsos, maior seria a velocidade de rotação do eixo. O sinal de *dir* define o sentido de rotação do eixo do motor em função do seu estado lógico (nível alto ou nível baixo). Os sinais de *step* e *dir* são gerados pelo mesmo controlador ARM da fonte Digiplus, e disponibilizados em saídas digitais na placa do equipamento.

Como discutido anteriormente neste trabalho, um dos principais requisitos para a operação do MIG/MAG AD está na resposta dinâmica do motor que comanda a movimentação do arame, usualmente sendo necessário frequências de inversão próximas a 60 Hz. Sendo assim, o trabalho de desenvolvimento teve início com a realização de testes para a avaliação da resposta na inversão do movimento de três diferentes

sistemas de acionamento: motor CC, motor de passo e servomotor CA, cada qual com seu respectivo driver de potência. O servomotor CA foi ainda testado em duas versões de potência, 100 W e 200 W. Para todos os modelos de motores ensaiados, foram testadas as frequências de reversão de 40 Hz, 50 Hz e 60 Hz, com sinais de passo/direção (*step/dir*) impostos por meio de geradores de função.

A primeira etapa para análise da performance dos motores consistiu em um teste a vazio, isto é, com o motor livre para rotacionar seu eixo sem nenhum tipo de acoplamento. Nestas condições os motores não deveriam apresentar limitações para operação, com exceção das suas próprias limitações construtivas. O objetivo deste teste foi verificar o máximo deslocamento angular que cada tecnologia de acionamento é capaz de oferecer para as diferentes condições de frequência de inversão comandadas. Utilizou-se do recurso de filmagem em alta velocidade para o acompanhamento e posterior medição do movimento do eixo do motor com o auxílio de um *software* de tratamento de imagens. As aquisições foram feitas numa taxa de 4000 frames por segundo. A Figura 60 mostra a bancada de realização dos testes e na Figura 61 é mostrado um exemplo da variação angular do eixo na metodologia utilizada. Cada uma das imagens na Figura 61 retrato o instante em que se atinge a posição extrema do movimento do motor. No exemplo, a posição inicial é indicada pela imagem A, enquanto que a imagem B indica a posição final, representando assim o que seria o movimento de avanço e recuo do arame. Para cada condição de frequência foram medidos os ângulos de rotação definidos entre os dois pontos extremos, e o valor médio foi calculado com base em uma repetição de três amostras. Conhecido o valor do ângulo de rotação, foi calculado ainda o deslocamento linear de arame, considerando o acoplamento um rolete de diâmetro igual a 28,8 mm no eixo do motor.

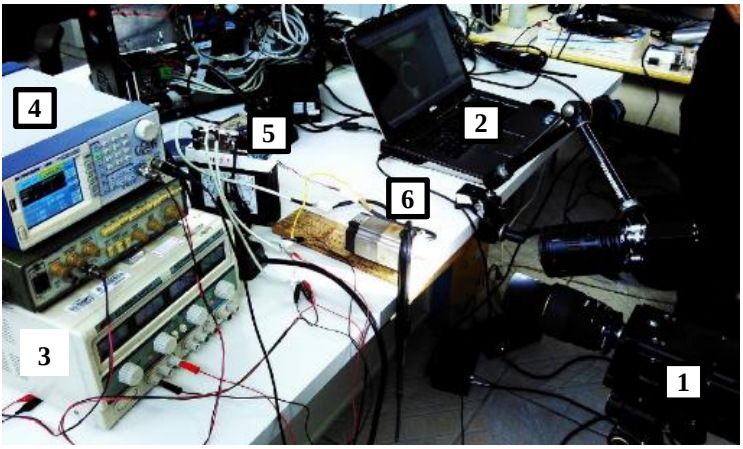


Figura 60 – Bancada utilizada nos testes de inversão de rotação dos motores; 1 – Câmera de alta velocidade; 2 – Software Motion Studio; 3 – Fonte de alimentação; 4 – Geradores de função; 5 – Driver servomotor; 6 – Servomotor

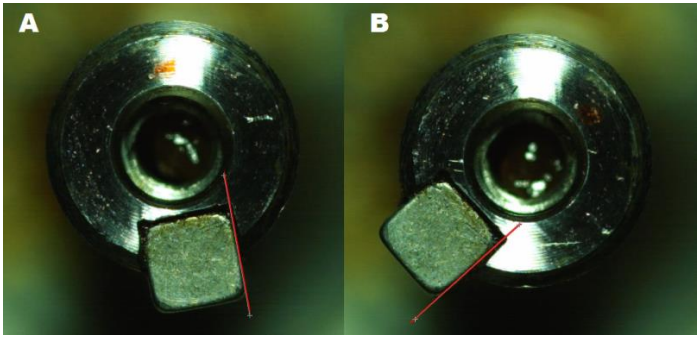


Figura 61 – Exemplo da medição da variação angular de um servomotor CA com frequência de inversão de sentido de 50 Hz. A - Posição inicial; B - Posição final

Na segunda etapa os motores foram submetidos à carga, tracionando um arame de solda de maneira similar à aplicação de soldagem. Para a realização desse teste os motores foram fixados ao conjunto tracionador de arame disponível no cabeçote alimentador da fonte IMC mostrado na Figura 62. Para viabilizar a instalação do rolete no eixo dos motores foram usinadas buchas em nylon. O monitoramento e medição da inversão do movimento foi agora baseado no deslocamento do arame, sendo também utilizado o recurso de filmagem em alta

velocidade. O arame era movimentado sobre uma folha de papel milimetrado que serviu como referência para as medições de deslocamento. A bancada de ensaios pode ser visualizada na Figura 63.

Figura 62 – Cabeçote alimentador utilizado para confecção de primeiro protótipo

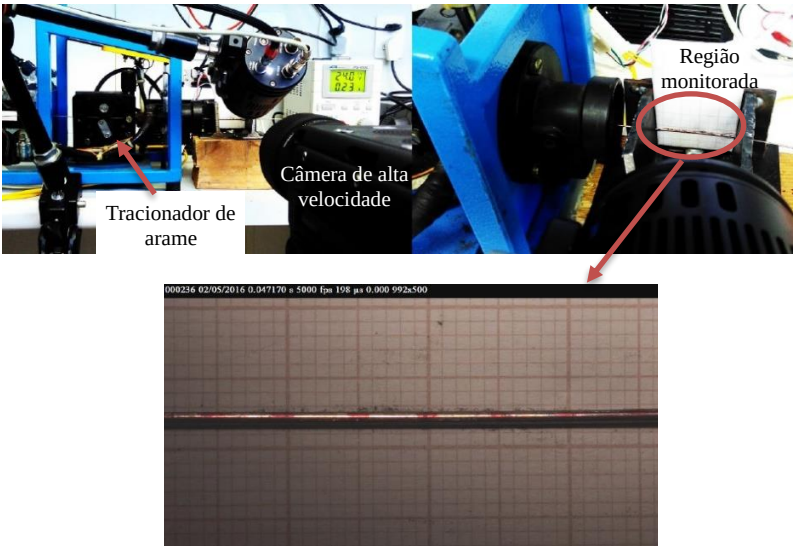


Figura 63 – Disposição de equipamentos durante realização de ensaio com carga, com detalhe para a região de monitoramento do deslocamento do arame

O funcionamento da soldagem MIG/MAG AD é totalmente dependente do controle sobre o avanço e recuo do arame, e do sincronismo desse movimento com os sinais elétricos de corrente e tensão da soldagem. A fim de se minimizar problemas de alimentação ou atrasos

na resposta do arame em relação ao comando de avanço e recuo, o comprimento de arame entre o tracionador e o bico de contato da tocha deve ser o menor possível. Da mesma forma que é encontrado em tochas do tipo push-pull, onde o motor/tracionador está instalado no corpo da própria tocha, o comprimento de arame após o tracionador nesse caso deve se limitar a, praticamente, o comprimento do pescoço da tocha. Sendo assim, a proposta inicial para a construção do primeiro protótipo para ensaios de soldagem teve como base o alimentador de arame do fabricante IMC mostrado na Figura 62, realizando a adaptação de um pescoço de tocha MIG posicionado diretamente na saída dos roletes tracionadores, o que está sendo mostrado na Figura 64. Tendo em vista a possibilidade de posicionamento do rolo de arame no mesmo cabeçote responsável por realizar a alimentação dinâmica (Figura 62), os testes iniciaram ainda sem a premissa de se ter um segundo dispositivo tracionador para fornecer o arame do rolo. Todavia, visando o desenvolvimento de uma versão mais compacta para o protótipo, e com o objetivo de descarregar do motor de elevada dinâmica a inércia do rolo, foi acrescentado um cabeçote de alimentação adicional ao sistema. Entre os dois cabeçotes o arame foi mantido solto, simplesmente acomodado em um conduíte para uma proteção mecânica. A velocidade de avanço no cabeçote secundário obedece aquela previamente configurada pelo operador na interface da fonte.

Figura 64 – Adaptação de cabeçote alimentador de arame para a realização de soldagem MIG/MAG AD

Com base nos resultados obtidos nos testes de avaliação dos motores e, posteriormente, com os promissores resultados alcançados em depósitos de soldagem, foi realizado o projeto de uma segunda versão para o protótipo da tocha. O intuito principal foi a redução das suas dimensões, facilitando a operação de soldagem com a movimentação da

tocha e possibilitando ainda a realização futura de testes manuais de soldagem. A Figura 65 mostra o modelo concebido. Para garantir o isolamento elétrico entre o motor e o circuito da solda, utilizou-se uma chapa de material polimérico como base para a sustentação dos componentes. O isolamento elétrico para com o eixo do motor foi feito por intermédio da peça de acoplamento ao rolete, fabricada em nylon.

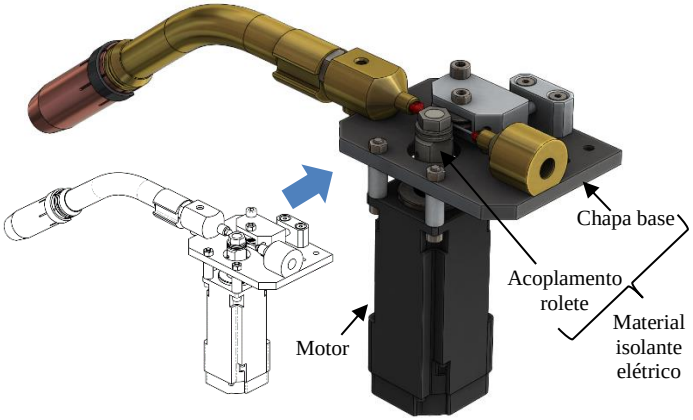


Figura 65 - Concepção de segundo protótipo de tocha para sistema de soldagem alimentação dinâmica integrado

4.3.5.2. Definição de estratégias de controle e realização de ensaios de soldagem

Neste trabalho foram definidas estratégias para o controle do processo de soldagem MIG/MAG com alimentação dinâmica de arame, utilizando os protótipos anteriormente apresentados de maneira integrada com o controlador da fonte de soldagem. Inicialmente, as estratégias de controle foram definidas para uso em uma soldagem com arame de alumínio, uma vez que para esses casos, a configuração da forma de onda de corrente utilizada usualmente aplica apenas três patamares de corrente: corrente de pulso no arco, corrente de base no arco e corrente de curto circuito. Durante a fase de arco, o sinal de direção (*dir*) comandado para driver do motor seria o de avanço, com uma velocidade de avanço fixa

em toda a fase. Durante o curto, o sinal de direção seria correspondente ao comando de retorno do arame. A Figura 66 mostra a definição inicial da curva de corrente e do comando de inversão enviado para o motor responsável pelo movimento de avanço e recuo do arame.

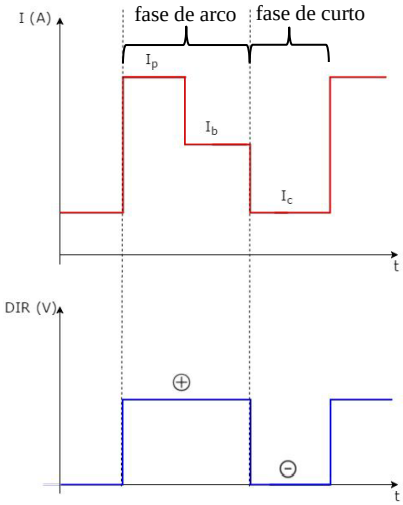


Figura 66 – Definição inicial para forma de onda de corrente e comando de inversão do motor do sistema de alimentação dinâmica

A flexibilidade para a determinação de quais parâmetros deverão ser controlados é evidenciada pelo fato de se ter aqui a total possibilidade de intervenção no software da máquina de soldagem. Por esse motivo, a metodologia de desenvolvimento proposta vislumbrou, em sequência, um conjunto de parâmetros aos quais poder-se-ia ter acesso ou pela interface da máquina, ou diretamente no código de programação. A Figura 67 mostra os oscilogramas estilizados para os parâmetros de Va, I e U, e a Tabela 8 descreve os parâmetros indicados na figura.

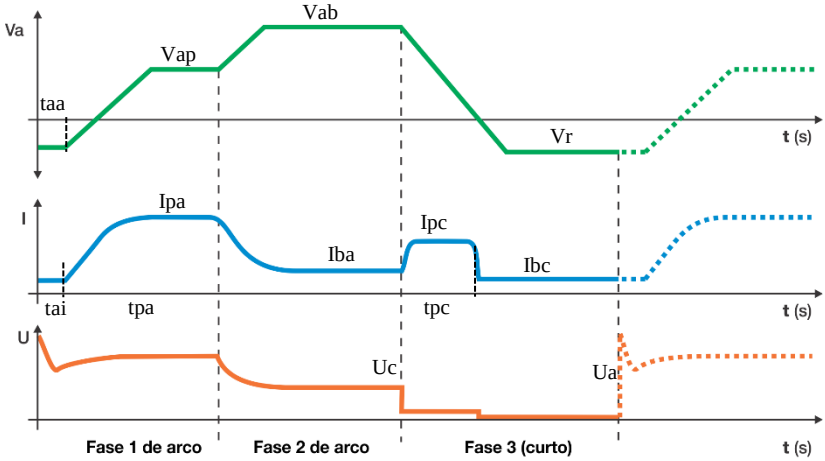


Figura 67 – Oscilogramas estilizados de Va, I e U para a versão MIG/MAG AD

Tabela 8 – Descritivo de parâmetros para soldagem MIG/MAG AD

Parâmetro	Unidade	Descrição
Ipa	(A)	Corrente de pulso no arco
Iba	(A)	Corrente de base no arco
Ipc	(A)	Corrente de pulso no curto
Ibc	(A)	Corrente de base no curto
tpa	(ms)	Tempo de pulso no arco
tpc	(ms)	Tempo de pulso no curto
tai	(ms)	Tempo de atraso na corrente após a abertura do arco
taa	(ms)	Tempo de atraso no comando de inversão do arame após a abertura do arco
Vap	(m/min)	Velocidade de avanço de arame no pulso durante o arco
Vab	(m/min)	Velocidade de avanço de arame na base durante o arco
Vr	(m/min)	Velocidade de retorno de arame
Ua	(V)	Tensão de referência para detecção de abertura do arco
Uc	(V)	Tensão de referência para detecção do curto-circuito

A definição dos parâmetros acima fez parte da fase inicial de desenvolvimento do software. Em sequência foram determinados os requisitos e interações entre parâmetros que fundamentaram a estruturação lógica do programa na forma de algoritmos. A escrita do software foi feita em linguagem C++, utilizando a plataforma de desenvolvimento µVision - Keil.

No decorrer do desenvolvimento do software e como forma de avaliação e testes das lógicas de programação implementadas, foram realizados ensaios de soldagem utilizando os protótipos apresentados na Figura 64 e Figura 65. Devido às dimensões da primeira versão de protótipo concebida, optou-se por realizar a movimentação da peça submetida à soldagem, ao invés da tocha. Para isso, utilizou-se um manipulador cartesiano do tipo Tartílope V2. Durante a realização dos ensaios foram utilizados o sistema de dados do processo – SAP, assim como a câmera de alta velocidade IDT. A bancada de ensaios montada com a primeira configuração do equipamento pode ser visualizada na Figura 68.

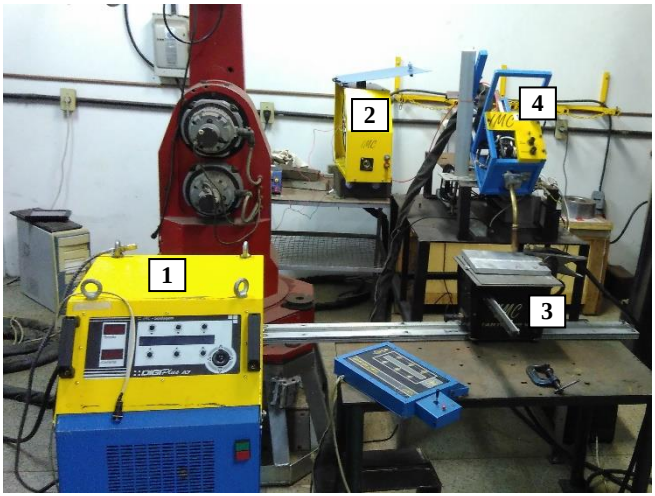


Figura 68 – Bancada de ensaios com versão inicial do protótipo; 1-Fonte de soldagem; 2-Cabeçote de alimentação de arame secundário; 3- Manipulador para deslocamento da peça; 4-Protótipo de tocha para alimentação dinâmica de arame

Utilizando o protótipo 1 foram realizados ensaios de soldagem que resultaram em uma primeira avaliação das estratégias de controle implementadas. Para tanto, foram realizados depósitos sobre chapa com o objetivo de se verificar a regularidade da deposição feita com o modo MIG/MAG AD desenvolvido. Utilizou-se nesses ensaios os arames de alumínio ER5183, ER4043 e de aço carbono ER70S-6, todos de 1,2 mm de diâmetro. Os depósitos referentes ao alumínio foram feitos em chapas de 2 mm de espessura e proteção gasosa de argônio com vazão de

15 l/min. Os depósitos em aço foram realizados sobre chapas de 3 mm de espessura, com proteção gasosa da mistura 75% Ar e 25% CO_2 e vazão de 15 l/min. Todos os ensaios foram feitos na posição plana, com velocidade de soldagem que variou entre 30 e 45 cm/min e distância do bico de contato até a peça (DBCP) de 18 mm. A Tabela 9 apresenta os valores de corrente e tempos regulados para a etapa de soldagem dos três materiais depositados. A regulagem da velocidade de arame no avanço e no recuo foi feita de maneira empírica, objetivando um melhor resultado em termos de estabilidade do arco, com a maior frequência de transferência possível para os parâmetros de corrente regulados.

Tabela 9 – Parâmetros regulados em depósitos realizados com primeiro protótipo do sistema MIG/MAG AD

Depósito nº	**Arame**	**Material base**	**Ipa (A)**	**Iba (A)**	**Ipc (A)**	**Ibc (A)**	**tpa (ms)**	**tpc (ms)**
1	ER5183	Alumínio	130	60	0	30	8	0
2	ER4043	Alumínio	150	70	0	50	8	0
3	ER70S-6	Aço	250	40	220	80	5	3

A segunda etapa de ensaios utilizou a configuração de bancada mostrada na Figura 69, agora com a possibilidade de se movimentar a tocha ao invés da peça. O dispositivo protótipo desenvolvido pode ser observado na Figura 70, que mostra em detalhe os roletes responsáveis pela transmissão do movimento para o arame. Foram realizados depósitos com os mesmos arames de alumínio e aço anteriormente citados. Os parâmetros de corrente regulados nos ensaios tiveram como referência inicial os valores obtidos com o equipamento da Fronius para a versão CMT. Foram realizados testes em diferentes níveis de corrente com o objetivo de verificar a funcionalidade do dispositivo desenvolvido e as frequências de transferência alcançadas, sem a premissa de se obter um procedimento de soldagem para um corpo de prova previamente estabelecido. A proposta dos ensaios foi a de se validar o uso da ferramenta desenvolvida por meio de depósitos utilizando arames de alumínio e aço carbono, verificando por meio de oscilogramas e vídeos de alta velocidade, o comportamento do equipamento e da transferência metálica.

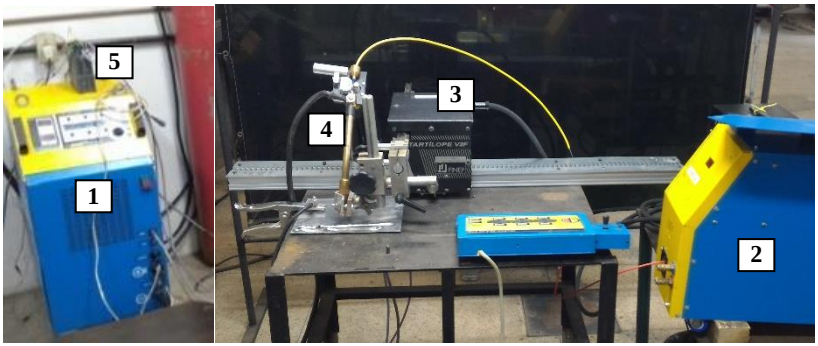


Figura 69 – Bancada de ensaios montada com segunda versão do protótipo para soldagem MIG/MAG AD; 1-Fonte de soldagem; 2-Cabeçote de alimentação de arame secundário; 3- Manipulador para deslocamento da tocha; 4-Protótipo de tocha para alimentação dinâmica de arame; 5-Driver de acionamento do motor do protótipo

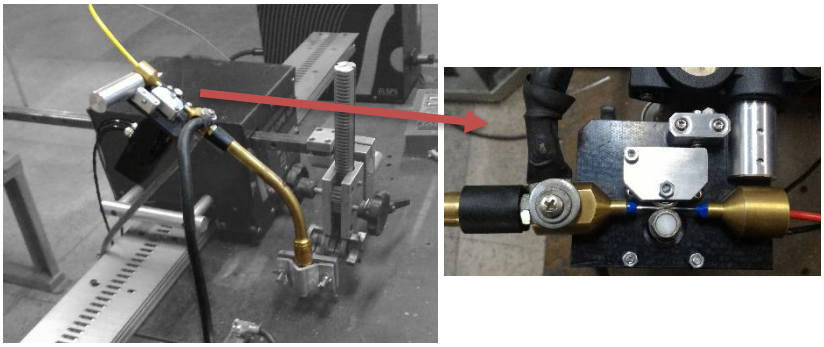


Figura 70 – Detalhe de segunda versão do protótipo de tocha posicionado em manipulador Tartílope para soldagem MIG/MAG AD

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. CORREÇÃO DO ARCO (ETAPA 1)

Com a primeira sequência de ensaios, definida no item 4.3.2, foi possível obter os dados elétricos correspondentes às cinco regulagens do parâmetro correção de arco previamente definidas. O resultado é apresentado na Tabela 10. É notável que, à medida que o parâmetro de correção do arco aumenta, tem-se também um aumento dos valores de tensão (média e eficaz). A variação da tensão teve um comportamento bastante linear, como pode ser constatado na Figura 71. Com base nos valores de correção avaliados observa-se ainda que a corrente, tanto em valor médio quanto eficaz, reduziu com o aumento de CAr, principalmente nas regulagens de 15 e 30%. Com isso, a velocidade de arame média fornecida pelo cabeçote também sofreu uma redução, que pode ser considerada significativa para os maiores valores de CAr.

Tabela 10 – Valores obtidos com a aquisição de dados na avaliação do parâmetro correção do arco, Va regulada em 5 m/min

Correção do Arco	**-30%**	**-15%**	**0**	**15%**	**30%**
Um (V)	11,1	12	12,9	14,3	16,9
Im (A)	102	101	100	95	85
Uef (V)	14,7	15,4	16	16,8	18,2
Ief (A)	118	117	115	110	97
P (W)	1575	1620	1645	1622	1559
Va m (m/min)	4,2	4,1	3,9	3,4	2,9
ta (ms)	7,9	8,8	10,3	13,9	25,8
tc (ms)	7,8	7,2	6,8	6,8	5,1
T (ms)	15,7	16	17,1	20	30,9
ta/tc	1,0	1,2	1,5	2,3	5,1

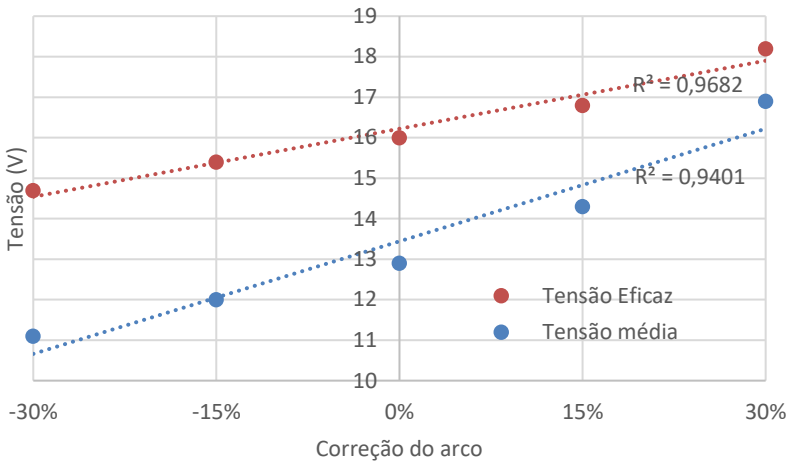


Figura 71 – Variação das tensões média e eficaz em função da regulagem na correção do arco, na soldagem com arame inoxidável 309LSi, com 1,0 mm de diâmetro

Analisando os oscilogramas de tensão e corrente correspondentes a esses ensaios verifica-se que, à medida que o valor percentual da correção do arco aumenta, tem-se um aumento no tempo de arco aberto (ta) e uma redução no tempo de curto circuito (tc). A Figura 72 apresenta os gráficos correspondentes às regulagens ensaiadas, e os valores medidos estão dispostos na Tabela 10. Para CAr -30%, os tempos de arco e de curto-circuito são praticamente os mesmos. A relação entre ta e tc aumenta para os maiores valores de CAr, chegando a permanecer 5 vezes mais tempo com arco aberto em CAr 30%. Pode-se constatar também que os valores dos patamares de corrente que definem a curva do CMT não sofrem alteração em função da mudança na correção de arco. O que de fato teve alteração foi o tempo da corrente de base no arco (Isc_wait) e o tempo de curto circuito. A alteração nos tempos é que acaba influenciando na redução dos valores médios e eficazes da corrente. Em ambos os casos, a definição dos tempos não é uma escolha do usuário. Estes são uma consequência direta da velocidade com que o arame aproxima ou afasta da peça.

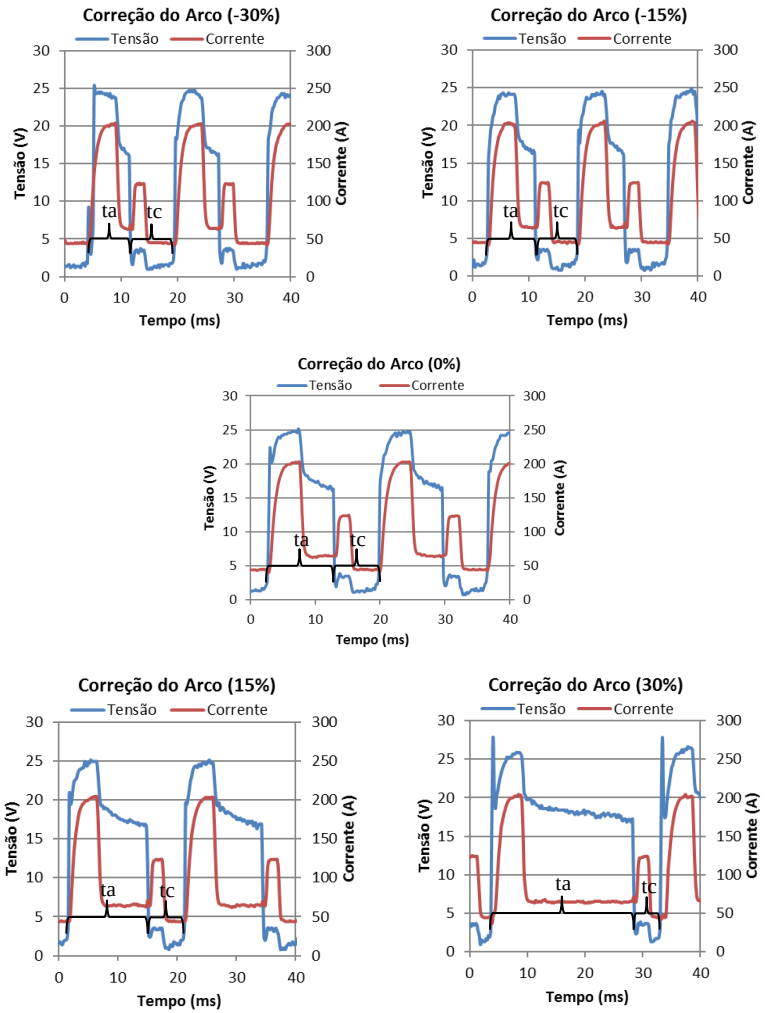


Figura 72 – Oscilogramas de tensão e corrente sob diferentes configurações do parâmetro correção do arco

A mudança nos tempos de arco e de curto reflete em alterações no período de transferência, que é aumentado significativamente para o lado positivo da regulagem da correção do arco, especificamente para os valores de 15% e 30%. A curva de tendência plotada para período de

transferência em função da correção do arco, apresentada em verde na Figura 73, evidencia esse comportamento. Como o tempo de curto-circuito sofre uma redução com o aumento da correção do arco, e o tempo do pulso de corrente se mantém o mesmo, o principal responsável por esse aumento no período é o tempo da corrente de base no arco, que seria o tempo utilizado para a aproximação do arame à peça, representado pela curva azul na mesma figura.

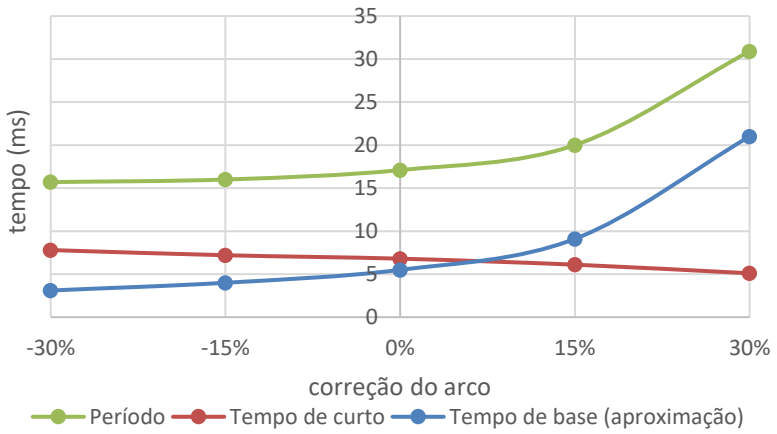


Figura 73 – Variação do período de transferência e tempos de aproximação e curto-circuito em função da correção do arco

Na segunda sequência de ensaios foram realizadas filmagens de alta velocidade com foco nos roletes na tocha. A Tabela 11 apresenta os valores de velocidade calculados com base nos ângulos de rotação do rolete. Com os dados apresentados é possível constatar a atuação da fonte de soldagem na alteração dos valores de velocidade de avanço e recuo do arame, em função da mudança no valor de CAr. Na faixa que a regulagem da correção de arco foi ensaiada, a variação da velocidade em função de CAr teve um comportamento bastante linear, o que pode ser visto com a Figura 74. A velocidade de avanço foi alterada pela fonte de forma inversamente proporcional à correção do arco. Quanto maior o valor da correção do arco, menor é a velocidade de aproximação e consequentemente maior será o tempo de arco aberto. Em outras palavras, o arame/gota vai demorar mais tempo para encostar na peça e iniciar a transferência por curto-circuito. A velocidade de recuo tem uma alteração diretamente proporcional à correção do arco. Quanto menor o valor da

correção, menor é a velocidade com que o arame é puxado da poça, o que acaba prolongando o tempo de curto-circuito.

Tabela 11 – Medições correspondentes às velocidades de avanço e recuo de arame em função do parâmetro correção do arco

Correção do Arco	-30%	-15%	0	15%	30%
Velocidade de recuo (m/min)	-25,8	-28,6	-30,9	-33,0	-33,8
Velocidade de avanço (m/min)	41,0	37	30,8	23,1	13,7

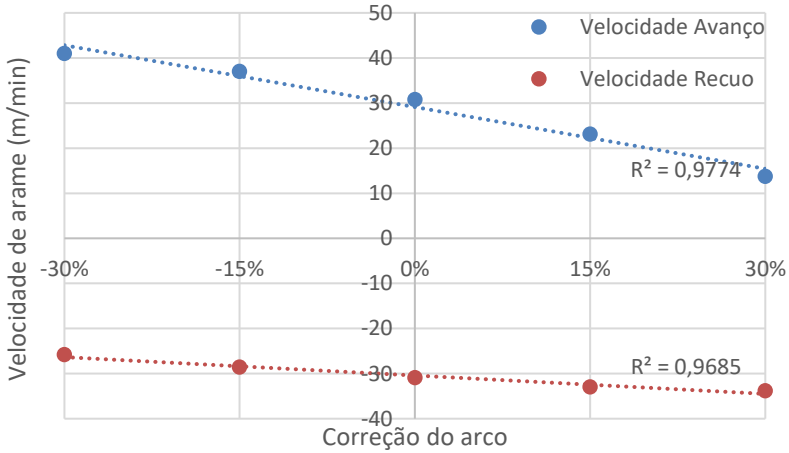


Figura 74 – Variação das velocidades de avanço e recuo do arame medidas na tocha de acordo com o valor de correção do arco

A realização da filmagem dos roletes da tocha em sincronia com os dados de tensão e corrente permitiu também a avaliação dos instantes de inversão do movimento do arame com relação aos parâmetros elétricos. A Figura 75 foi obtida com o mesmo software de gerenciamento de imagens da câmera IDT, o Motion Studio. Apesar do equipamento possibilitar o sincronismo do vídeo com até 16 sinais anal de entrada, a interface de geração dos gráficos possui recursos limitados e, dessa forma, justifica-se aqui as diferenças nas escalas apresentadas nos cinco oscilogramas contidos na figura. As linhas verticais da cor verde traçadas sobre os oscilogramas indicam o instante em que o motor da tocha parou o seu movimento (velocidade=0) durante a inversão da rotação. Percebe-

se que, após a ocorrência do curto-circuito o arame continua avançando sobre a poça até o instante de parada indicado pela letra A. Observa-se aqui certa relação do final do pulso de corrente que é dado no curto-circuito com a efetiva parada do arame. Após a abertura do arco, o arame ainda continua sendo recuado até o instante marcado pela letra B.

Avaliando o conjunto de gráficos contidos na Figura 75, observa-se que, à medida que se altera o parâmetro correção do arco, ocorre uma mudança na relação entre os tempos que o arame está avançando (seta vermelha) e os tempos que o arame está recuando (seta laranja). Maiores valores de CAr refletem em maior tempo de avanço do arame, ou seja, mais tempo de arco aberto.

Em complementação ao resultado obtido com a filmagem dos roletes, foram realizados vídeos com o foco voltado para a transferência metálica, objetivando assim verificar o máximo comprimento de arco obtido em função do parâmetro CAr. A Figura 76 apresenta uma montagem de imagens adquiridas com cada uma das configurações, extraídas no instante de máximo de retorno do arame, após a reabertura do arco. Na imagem é possível constatar que os maiores valores de CAr geraram um maior comprimento de arco máximo, e que a variação verificada em toda faixa regulável foi de cerca de 1,5 mm. Apesar disso, não é possível verificar uma linearidade nos resultados em toda a faixa de configuração. Para os valores -30 e -15%, o resultado obtido permaneceu inalterado, assim como para os valores de 15 e 30%. A observação colocada é de que além de ser verificado que houve um maior comprimento de arco máximo para as situações de maiores CAr, o maior tempo de arco aberto nessas condições também contribui para que se tenha um comprimento de arco aparentemente maior.

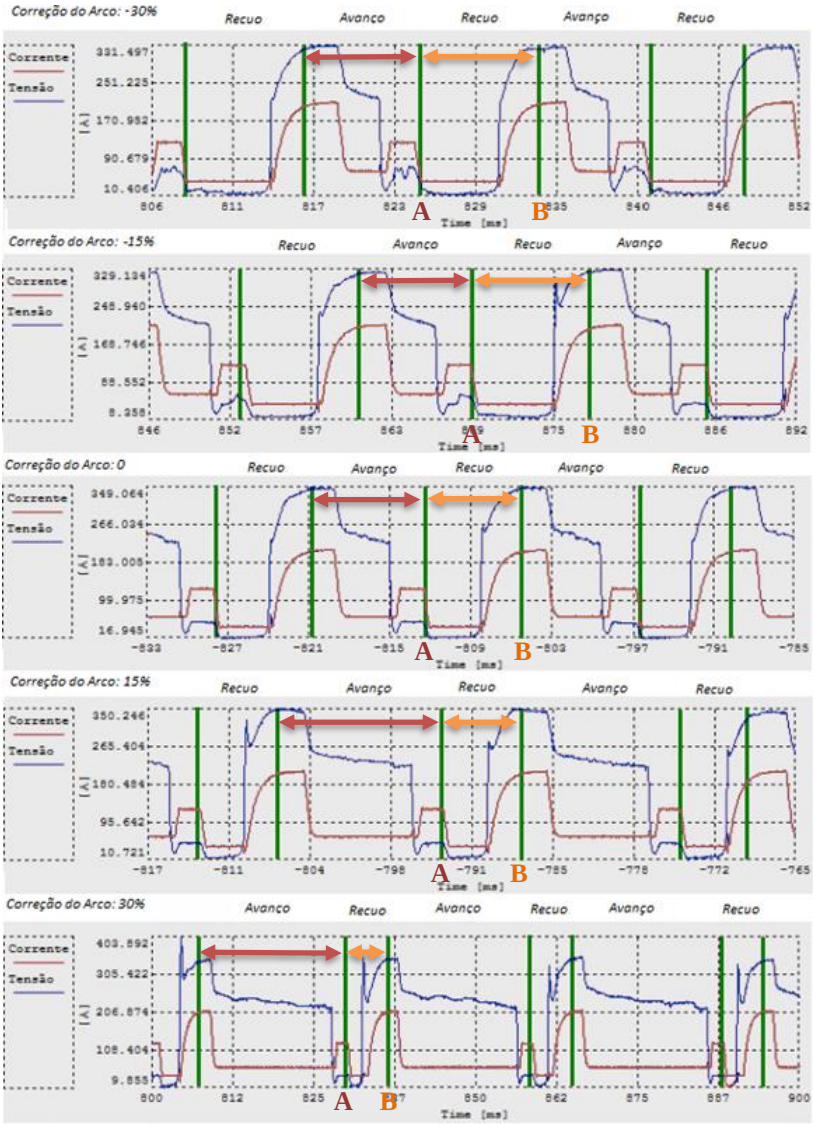


Figura 75 – Instantes de inversão de movimento de avanço e recuo do arame nas diferentes configurações da correção do arco

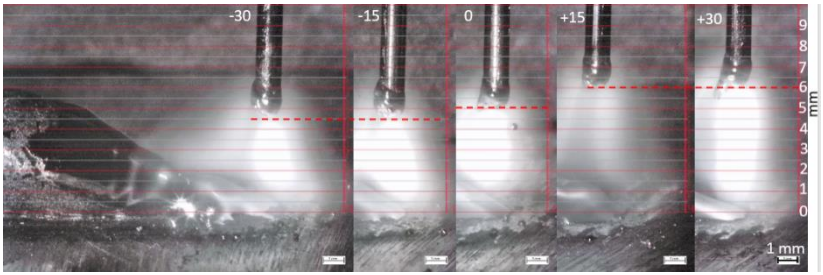


Figura 76 – Variação do máximo comprimento de arco em função da correção de altura de arco no CMT, programa sinérgico de aço inoxidável

5.2. CORREÇÃO DINÂMICA (ETAPA 2)

As análises feitas sobre o parâmetro chamado Correção dinâmica foram, fundamentalmente realizadas com o programa sinérgico para aço carbono (G3Si) com o arame ER70S-6 de 1,2 mm. Para o melhor entendimento das atividades desenvolvidas e dos resultados alcançados, elas foram subdivididas em tópicos os quais serão abordados e descritos detalhadamente a seguir.

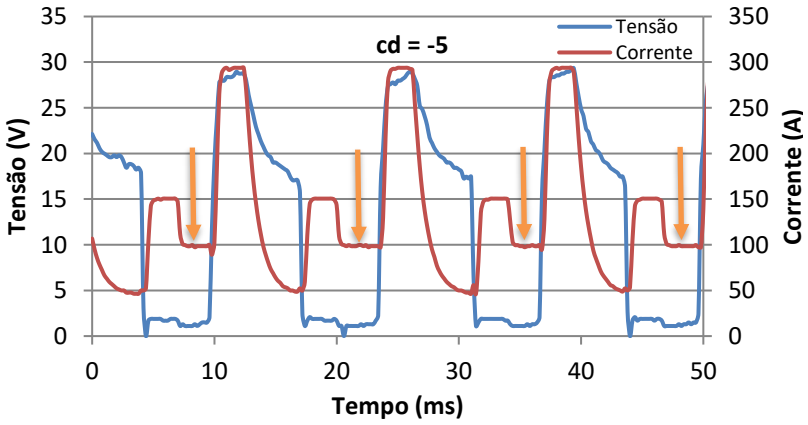
5.2.1. Ensaios com movimentação linear da tocha

Conforme descrito anteriormente neste trabalho, a primeira sequência de ensaios consistiu na realização de depósitos com três configurações distintas para o parâmetro CD. O resultado da aquisição de dados com o SAP está apresentado, em primeira forma, na Tabela 12. As colunas do ensaio com DBCP variável se referem ao item 5.2.2 deste trabalho. Analisando os dados, fica evidente uma redução no valor da corrente média com o aumento no valor de CD. Na variação de CD = -5 para CD = +5, o valor de corrente média sofreu uma queda de cerca de 22%. Com essa redução, a velocidade de arame média, que é aquela medida na saída do rolo de arame, também seguiu a tendência e sofreu uma redução de 3,2 m/min para 2,6 m/min. Em termos de período de transferência, pode se considerar que os valores se mantiveram praticamente inalterados. Como houve uma redução na velocidade média do arame, o diâmetro de gota teórico (dg) foi menor para a condição CD = +5.

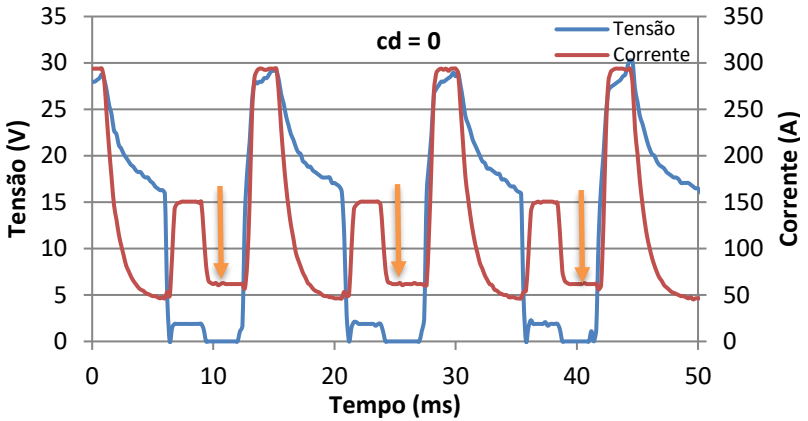
Tabela 12 – Dados de avaliação do parâmetro CD para programa sinérgico de aço

	DBCP Constante			DBCP Variável		
	cd = -5	cd = 0	cd = +5	cd = -5	cd = 0	cd = +5
Um (V)	13	12,7	12,9	14,3	14	13,7
Im (A)	133	121	104	131	118	100
Va(m/min)	3,2	3	2,6	3,1	2,8	2,5
Uef(V)	16,9	16,9	17,9	18,5	18,6	18,5
Ief(A)	155	147	137	153	144	133
P(W)	2156	2060	1831	2299	2178	1936
T (ms)	14	15	14	--	--	--
dg (mm)	1,17	1,17	1,09	--	--	--
ta (ms)	8	8	8	--	--	--

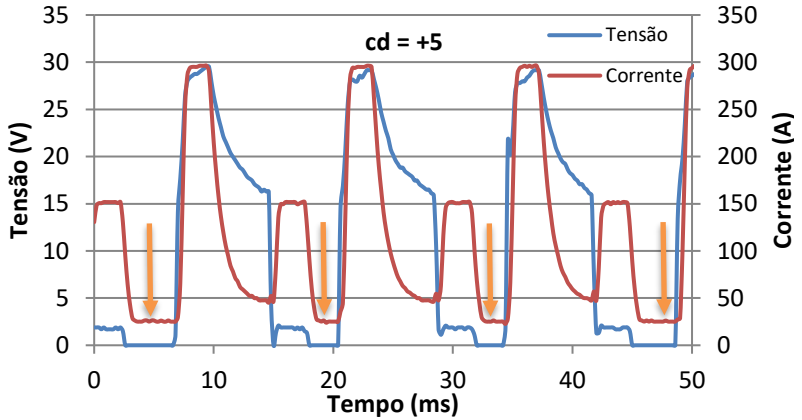
Em seguida, a Figura 77 apresenta os resultados obtidos na forma de oscilogramas de tensão e corrente. Nela constatou-se uma redução significativa nos valores de corrente impostos durante o tempo de curto, indicados pelas setas na figura. O valor variou de 100 A na condição CD = -5 para aproximadamente 25 A para um CD = +5, ou seja, uma redução de 75%.



A



B



C

Figura 77 – Alteração da corrente de curto-circuito para diferentes valores de "correção dinâmica", programa sinérgico para ER70S-6; A) CD = -5; B) CD = 0 e C) CD = +5

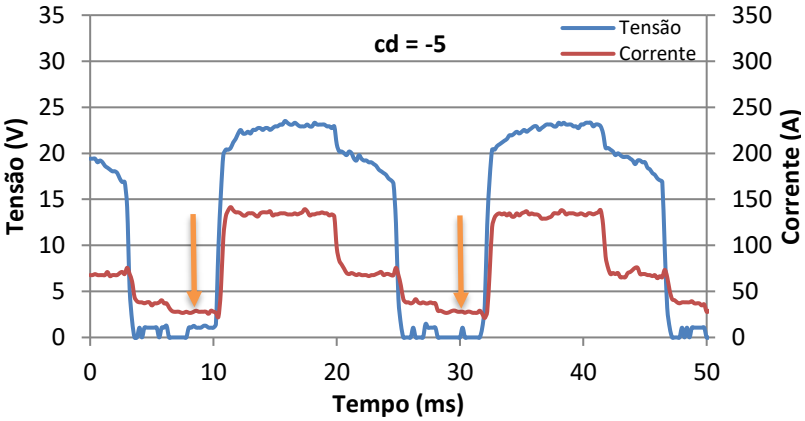
Dependendo do programa sinérgico que está sendo utilizado, a fonte de soldagem atribui outras funcionalidades para esse parâmetro. Na soldagem de ligas de alumínio, a correção dinâmica passa a se chamar "tempo de hotstart", e insere no início da soldagem uma fase que promove um maior aporte térmico para a chapa, como forma de minimizar os efeitos da alta condutividade térmica desse material. Para fins comparativos da atuação da fonte em outro programa sinérgico, foram feitos também depósitos em alumínio, com o arame ER5183 de 1,2 mm,

DBCP de 17 mm, gás Argônio na vazão de 15 l/min. Na fonte, utilizou-se o programa do CMT para arame AlSi5, 1,2 mm de diâmetro e gás Argônio. O resultado da aquisição de dados com o SAP está apresentado, em primeira forma, na Tabela 13. A Figura 78 apresenta os resultados obtidos na forma de oscilogramas de tensão e corrente.

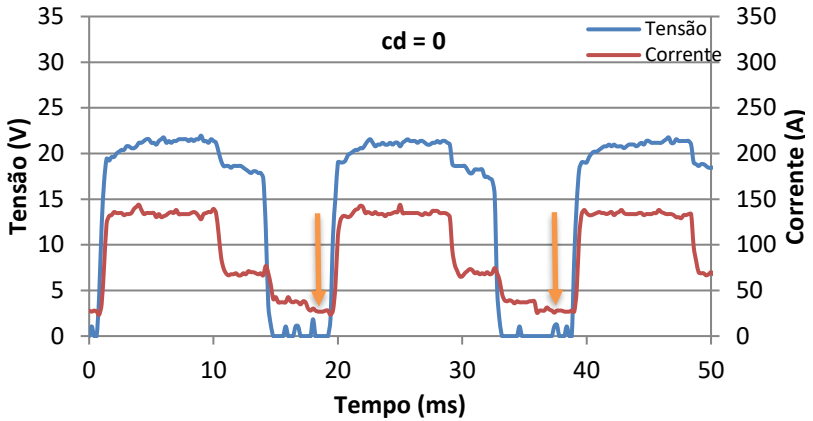
Tabela 13 – Dados de avaliação para programa sinérgico de alumínio

	cd = -5	cd = 0	cd = +5
Um (V)	14,4	14	14,2
Im (A)	86	88	87
Va(m/min)	5,9	6,1	6,2
Uef(V)	17,5	16,9	17,2
Ief(A)	97	99	98
P(W)	1625	1602	1621

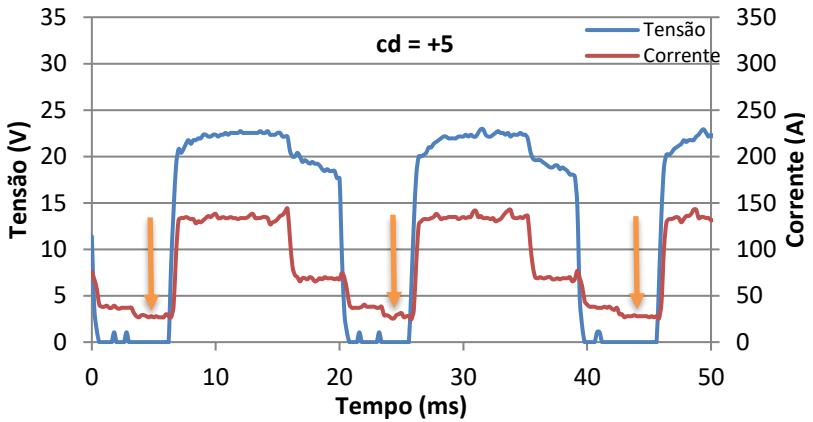
No caso do programa sinérgico utilizado para alumínio, não surgiram diferenças significativas entre os parâmetros medidos que foram apresentados na tabela. Observando também os dados na forma de oscilogramas que estão mostrados na Figura 78, constatou-se que não houve alteração no mesmo patamar de corrente afetado no programa sinérgico de aço carbono.



A



B



C

Figura 78 – Alteração da corrente de curto-circuito para diferentes valores de "correção dinâmica", programa sinérgico para alumínio; A) CD = -5; B) CD = 0 e C) CD = +5

5.2.2. Ensaios com variação da DBCP

A sequência dos ensaios previu a realização dos depósitos com mesmo arame de aço carbono e as mesmas condições de CD anteriormente citadas, com a diferença de estarem agora submetidos à uma alteração proposital da DBCP. Em primeira avaliação dos dados já apresentados na Tabela 12, observa-se a mesma tendência de alteração dos valores de corrente média e velocidade de arame com a mudança no valor de CD. Nos oscilogramas de tensão, corrente e velocidade de arame (medida no cabeçote) ressalta-se a resposta dinâmica do cabeçote alimentador de arame em função da variação da DBCP. Constata-se que a curva de Va medida no cabeçote, em verde na Figura 79, apresenta uma frequência de oscilação compatível com o tecimento realizado, que foi de 2 Hz.

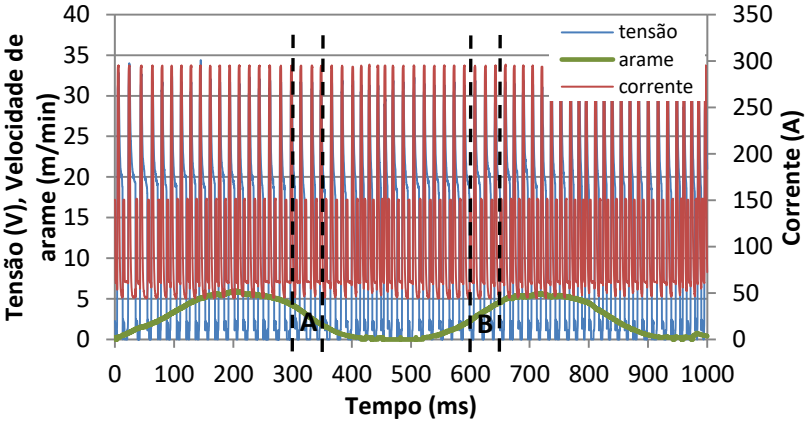
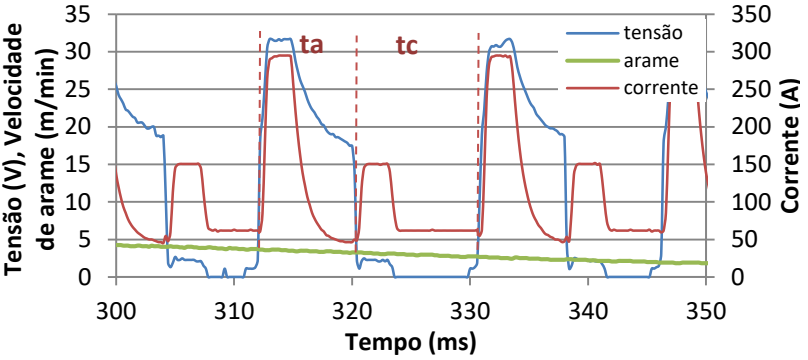


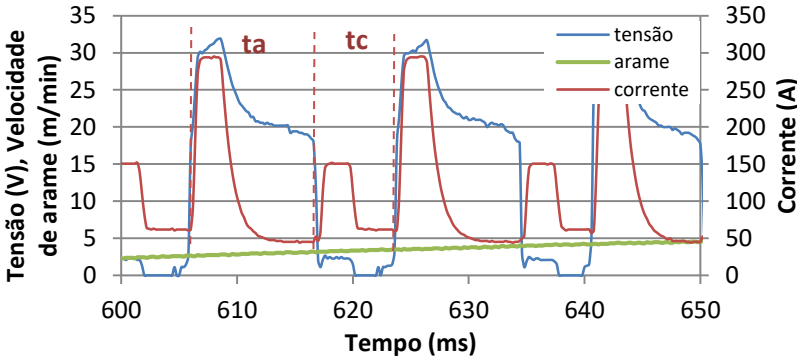
Figura 79 – Oscilogramas de tensão, corrente e velocidade de arame, com destaque para a resposta dinâmica em Va para variações na DBCP. Soldagem com ER70S-6, 1,2 mm de diâmetro, Va regulada em 4/min e CD = 0

A Figura 80 mostra em detalhe as regiões marcadas por A e B na Figura 79. Nela é possível se verificar o comportamento da forma de onda de tensão e corrente em função dos transitórios de aproximação e afastamento da peça. Pode-se aqui fazer uma análise em termos de velocidade relativa entre a tocha e peça. Em A, quando a peça está sendo aproximada da tocha, a velocidade de avanço do arame é somada com a velocidade de aproximação da peça, o que faz com que o tempo de arco aberto (ta) diminua. Durante o curto-circuito (tc), quando o arame começa

a ser recuado, a velocidade de recuo é subtraída da velocidade de aproximação da peça, fazendo com o curto-circuito seja mantido por mais tempo. A situação contrária é observada em B, quando a peça está sendo afastada da tocha. Foram analisados os momentos de transição para as três configurações de CD, e os dados de ta e tc medidos em uma determinada região da curva estão apresentados na Tabela 14. Fica evidente que os tempos de arco e de curto mudam em função da aproximação ou afastamento da peça.



A



B

Figura 80 - Oscilogramas de tensão, corrente e velocidade de arame em ensaio com variação de DBCP para regulagem de CD = 0; A – peça aproximando da tocha e; B – peça afastando da tocha

Tabela 14 - Tempos de arco e de curto em ensaios com variação da DBCP

	Va média diminuindo (tocha aproximando)			Va média aumentando (tocha afastando)		
	cd = -5	cd = 0	cd = +5	cd = -5	cd = 0	cd = +5
T (ms)	14,9	16,5	16	15,9	17,3	16,9
ta (ms)	7,2	7,9	7,7	9,9	10,8	10,5
tc (ms)	7,7	8,7	8,3	6,0	6,5	6,4

O monitoramento da resposta da fonte também foi feito com auxílio de uma câmera para filmagem em alta velocidade, sincronizada com os sinais de tensão e corrente. Em todos os ensaios com variação da DBCP foi feita a filmagem do rolete tracionador da tocha. A Figura 81 demonstra uma imagem obtida nesse monitoramento, com a indicação para o sentido de rotação correspondente ao avanço e recuo do arame.

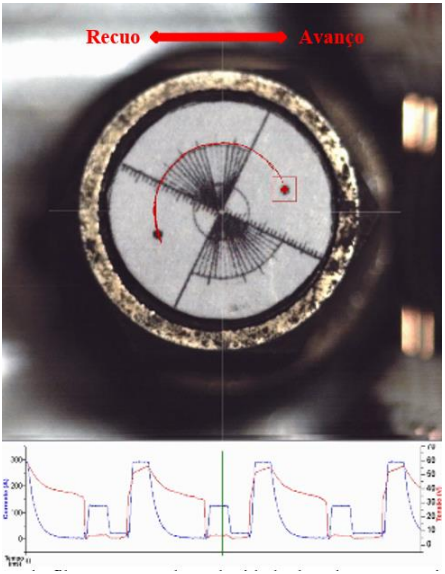


Figura 81 - Imagem obtida pela filmagem em alta velocidade do rolete que traciona o arame na tocha

Com base no ângulo de rotação verificado nos pontos de inversão do sentido do motor, foi possível calcular outras variáveis do processo,

como por exemplo, o deslocamento e a média da velocidade de avanço e recuo do arame. A Tabela 15 abaixo apresenta os valores medidos.

Tabela 15 – Resultados de deslocamento e velocidade medidos em ensaio com variação de DBCP

	Movimento Tocha/Peça	**Arame**	**Deslocamento (mm)**	**Velocidade (mm/s)**	**Velocidade (m/min)**
CD = -5	Aproxima	Avanço	2,8	361	21,7
		Recuo	-2,7	-356	-21,3
	Afasta	Avanço	3,5	351	21,1
		Recuo	-2,0	-319	-19,2
CD = 0	Aproxima	Avanço	2,9	372	22,3
		Recuo	-3,0	-368	-22,1
	Afasta	Avanço	3,5	364	21,8
		Recuo	-2,3	-352	-21,1
CD = +5	Aproxima	Avanço	3,2	375	22,5
		Recuo	-3,3	-379	-22,7
	Afasta	Avanço	4,3	373	22,4
		Recuo	-2,7	-358	-21,5

Em condições normais de operação, é razoável afirmar que, para a continuidade do processo e da alimentação de material, o arame deve avançar mais do que recuar, uma vez que parte do material está sendo depositado na peça a cada evento de curto-circuito. Por esse motivo, o rolete tracionador da tocha promove um maior ângulo de rotação no sentido de avanço do que de recuo. A sequência de imagens contida na Figura 82 mostra um evento de avanço e recuo nessas condições. Todavia, os dados apresentados na Tabela 15 mostram que, no ensaio onde se teve a variação cíclica da DBCP, e nas situações onde a peça estava aproximando da tocha, foi verificado que o avanço e recuo de arame tiveram praticamente o mesmo deslocamento. Esse fato conduz a interpretação de que, na condição testada, a média da velocidade de fusão do arame foi muito próxima da velocidade com que a peça se aproximava da tocha, fazendo com que a posição de rotação máxima e mínima do rolete fossem praticamente a mesma em diferentes ciclos de transferência. Em outras palavras, durante alguns períodos de transferência, o ângulo de avanço feito pelo rolete foi igual ao ângulo de recuo, assim como colocado na Figura 83. Nessa condição, o processo passa a não consumir arame do buffer, exigindo com que a velocidade de arame no cabeçote alimentador seja reduzida, assim como mostrado na Figura 79. Com a tocha se afastando, a situação volta a condição esperada, quando o

movimento de avanço de arame tem resultado de deslocamento maior do que o de recuo, neste caso ainda mais pronunciado pela diferença nas velocidades de avanço do arame e de afastamento entre a tocha e a peça.

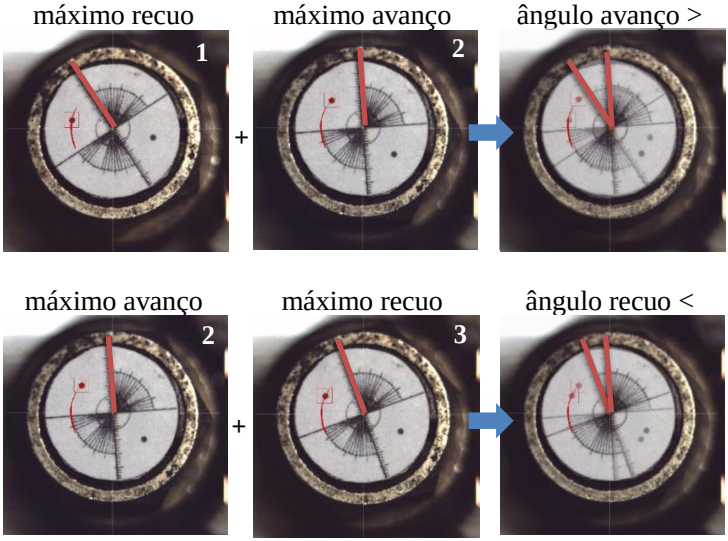


Figura 82 – Sequência de avanço e recuo do rolete em condições normais de operação

Figura 83 – Sequência de avanço e recuo do rolete durante aproximação relativa entre tocha e peça

Os valores calculados para a velocidade de avanço e também para a velocidade de recuo se mostraram muito próximos em todas as condições ensaiadas. Sendo assim não foi verificada uma atuação da fonte no sentido de alterar as velocidades de avanço ou recuo em função do parâmetro CD, mesmo em condições de variação brusca de DBCP como no ensaio proposto.

A condição de regulagem com CD = +5, onde se tinha a menor corrente de curto-circuito, foi aquela em que se encontraram os maiores problemas para a manutenção e estabilidade do arco. As situações com maior recorrência se tratavam de momentos onde o arco não era reestabelecido após o rompimento da ponte metálica. O oscilograma da Figura 84 mostra um exemplo do “apagão”, com a corrente indo para zero e a tensão indo para valores em vazio da fonte. De fato, utilizar uma menor corrente no curto-circuito contribui para uma redução no pré-aquecimento do arame, o que acaba prejudicando a reabertura do arco.

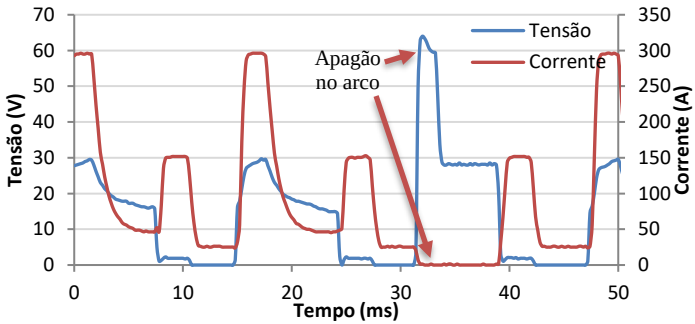


Figura 84 – Problema na reabertura do arco durante ensaio com CD +5

Outra dificuldade verificada trata de momentos que o arame acabou aderindo à poça metálica em solidificação, impedindo a reabertura do arco. Na Figura 85 tem-se um oscilograma que exemplifica essa situação. Mesmo com o movimento de retorno do arame feito pelo motor da tocha, o curto-circuito não é desfeito, aumentando o seu tempo de permanência. Diante disso, a fonte impõe um elevado valor de corrente de modo a provocar o aquecimento do material por efeito joule. O motor da tocha continua impondo a rotação no sentido de recuo do arame até o ponto que ocorre o rompimento do contato entre o arame e peça, com a reabertura do arco. A partir desse ponto, a fonte impõe um novo ciclo de CMT, começando com a corrente de pulso (Iboost).

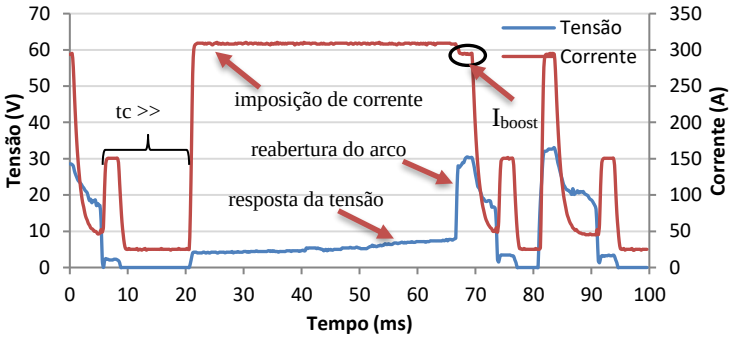


Figura 85 – Problema de adesão do arame à poça durante ensaio com CD +5

5.3. AVALIAÇÃO DE CARACTERÍSTICAS DE PROGRAMAS SINÉRGICOS DO CMT (ETAPA 3)

Como abordado em itens anteriores, é notável uma diferença no formato da onda de corrente imposta pala fonte CMT quando está selecionado um programa para uma liga de alumínio ou um programa para um arame de aço carbono. A principal observação é a existência de um pulso de corrente durante o curto-circuito em programas para aço carbono. Com a finalidade de se avaliar os efeitos da inserção desse pulso nas soldagens com arames de alumínio e aço, foram executados ensaios com os dois tipos de material nas situações com e sem pulso durante o curto.

5.3.1. Soldando alumínio com pulso durante o curto-circuito

Inicialmente, utilizando o arame de alumínio ER4043 foram feitos depósitos com o programa sinérgico condizente a este material, identificado na fonte por AlSi5. A velocidade de arame foi regulada em 5 m/min e os parâmetros de correção do arco e tempo de *hotstart* foram mantidos em 0 (zero). A Figura 86 apresenta os oscilogramas de tensão e corrente obtidos com essa configuração. Confirmando a característica do CMT, a transferência metálica aconteceu de maneira bastante estável, sem que houvesse a geração de respingos. A filmagem de alta velocidade está representada na mesma figura, onde pode-se constatar a estabilidade na deposição do material fundido. As setas colocadas na imagem indicam o avanço ou recuo do arame e os quadrados indicam o momento de parada durante a inversão do movimento.

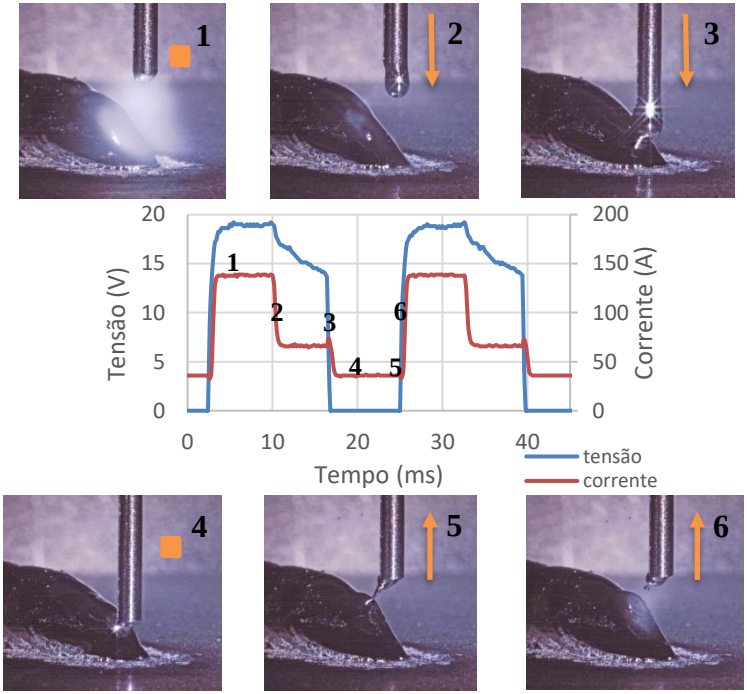


Figura 86 – Oscilogramas de tensão e corrente para soldagem com arame de alumínio ER4043 e programa sinérgico de alumínio AlSi5, Va regulada = 5 m/min

Em sequência, o programa sinérgico do aço foi editado com os parâmetros do programa sinérgico de alumínio. Dessa forma foi possível acrescentar o pulso de corrente durante o curto-circuito. Apesar disso, o equipamento não permite que o usuário escolha qual o valor da corrente que será imposta no pulso, ficando assim restrito àquele definido pela fonte. Como todos os patamares de corrente do CMT (Iarco, Ibase, Icurto) foram mantidos os mesmos daqueles utilizados pelo programa de alumínio, verificou-se que os valores de corrente (média e eficaz) aumentaram com relação ao programa original, o que tem relação com a inserção de um pulso a mais de corrente. O aumento nos valores de corrente provocou também um aumento na média da velocidade de arame. A Tabela 16 apresenta os valores medidos com o SAP.

Tabela 16 - Valores medidos em ensaios com e sem pulso de corrente durante o curto-circuito e arame de alumínio ER4043

	Etapa 1		**Etapa 2**	
	Sem pulso **Va = 5 m/min** (regulada)	Com pulso **Va = 5 m/min** (regulada)	Sem pulso **Va = 4 m/min** (regulada)	Com pulso **Va = 4 m/min** (regulada)
U_m (V)	11,7	11,3	10,7	9,2
I_m (A)	84	108	63	77
U_{ef} (V)	14,6	14,5	13,2	11,7
I_{ef} (A)	97	124	70	87
Va (m/min)	4,8	5,1	3,6	3,9
P (W)	1326	1450	815	742

No oscilograma da Figura 87 verifica-se que o curto-circuito ocorreu de forma antecipada, ainda durante a transição da corrente de pulso (Iboost) para a base (Isc_wait). Além disso, observa-se que o período de transferência obtido com o programa de aço foi menor do que com o programa original, o que pode ser visto com a sobreposição dos oscilogramas de corrente, na Figura 88.

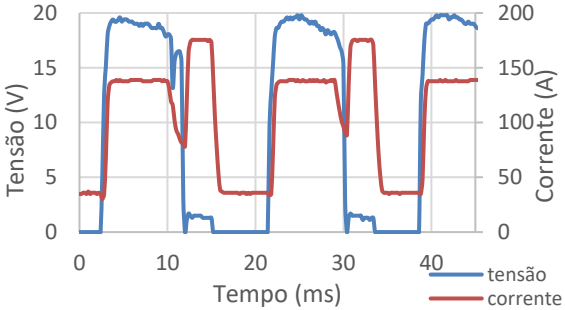


Figura 87 – Oscilogramas de tensão e corrente para soldagem com arame de alumínio ER4043 e programa sinérgico de aço G3Si adaptado, Va regulada = 5 m/min

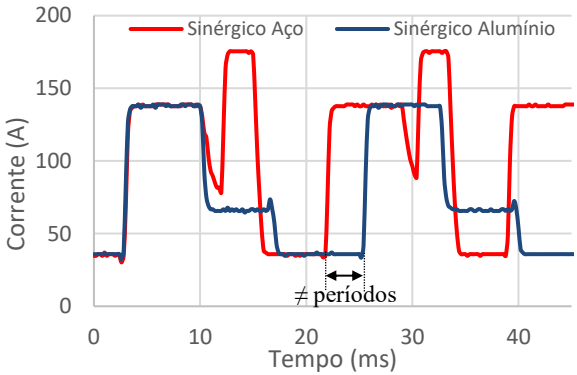


Figura 88 – Sobreposição de oscilogramas de corrente com e sem pulso na soldagem do alumínio ER4043

A frequência de transferência sofre influência direta das velocidades impostas pelo equipamento durante o avanço e recuo do arame. Como o equipamento CMT não permite a regulagem total desses parâmetros, a avaliação do efeito do pulso de corrente em mesmas condições de frequência fica impossibilitada. Apesar disso, a filmagem de alta velocidade foi realizada para as duas situações. A estabilidade de transferência alcançada com o sinérgico do alumínio foi mostrada anteriormente com os frames da filmagem dispostos na Figura 86. Com a inserção dos pulsos de corrente, o resultado observado foi um aumento no nível de respingos e instabilidades no arco. A Figura 89 mostra um trecho do oscilograma de tensão e corrente. Nela é possível verificar que o momento do curto-circuito é marcado por variações em ambos os sinais. O evento do curto circuito acontece ainda quando a corrente imposta está em níveis altos, no momento da transição do pulso para a base. Dessa forma, a gota de material fundido na extremidade do arame acaba sendo submetida a ação de forças eletromagnéticas repulsivas de intensidade suficiente para desfazer o contato entre gota e peça, logo nos seus instantes iniciais. A sequência de imagens identificadas de 1 a 4 mostra um desses momentos. No quadro 1 está registrado o momento anterior ao toque da gota, que acontece no quadro 2. Em seguida verifica-se em 3 que a ponte metálica de material fundido apresenta uma redução em sua área de contato, que é desfeita em 4 quando o arco é reaberto. No quadro 4 é possível verificar o deslocamento lateral da gota após a ruptura da ponte. A constatação feita explica a necessidade de se impor uma corrente de menor valor durante a espera do curto-circuito, assim como colocado para

o programa sinérgico de alumínio. A situação de instabilidade é piorada com a detecção do curto-circuito pela fonte, quando seria então imposto um novo pulso de corrente. Para o caso do alumínio percebe-se que a ponte metálica não oferece condições para a sustentabilidade do contato elétrico durante o pulso, ocasionando as micro explosões com ejeção de material demonstradas nos quadros de 5 a 7.

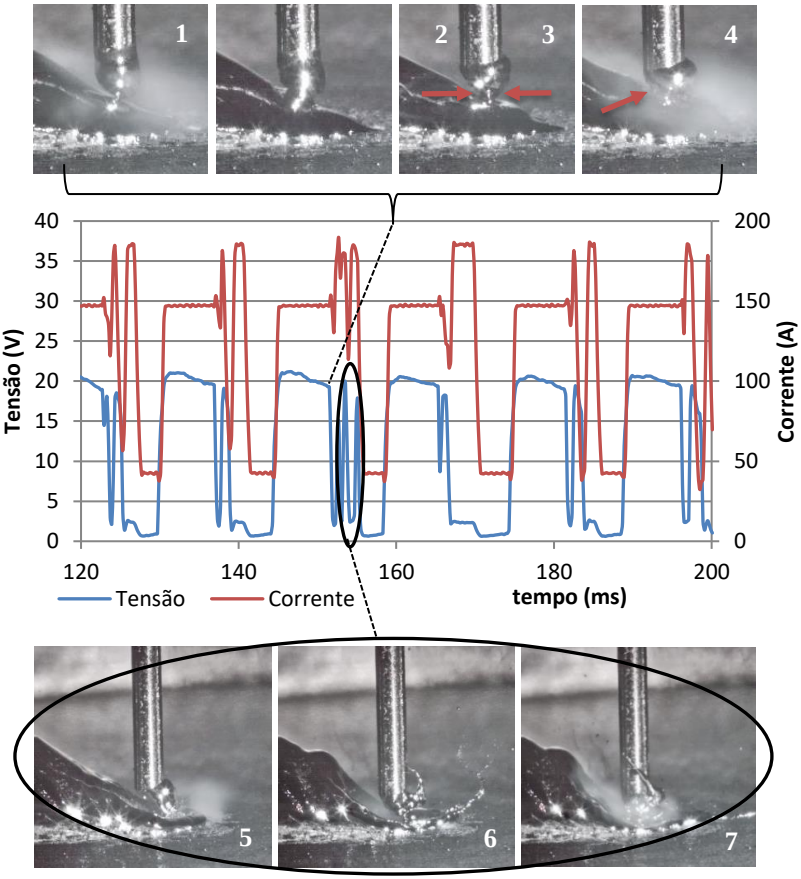


Figura 89 – Instabilidades ocorridas no momento do curto-circuito em ensaio com pulso de corrente na soldagem de alumínio ER4043, parâmetros correspondentes a Va = 5m/min

Na tentativa de ocasionar o curto-circuito durante menores valores de corrente de arco, também foram realizados ensaios com parâmetros correspondentes a velocidade de arame de 4 m/min. A Figura 90 apresenta os oscilogramas de tensão e corrente adquiridos durante um evento de transferência e a Figura 91 mostra frames retirados da filmagem em alta velocidade. Os números indicados nos oscilogramas se referem à instantes da transferência que foram destacados para as seguintes discussões e correspondem aos números marcados nas imagens da filmagem. Os valores médios e eficazes adquiridos com o SAP estão apresentados na Tabela 16.

O ponto marcado por 1 indica o momento que o arame parou de recuar e inicia o movimento de avanço em direção a poça. Observa-se que nesse instante, mesmo estando no final do pulso de corrente, a gota de material fundido possui pequenas dimensões, e continua crescendo ainda que submetida aos valores menores impostos para a corrente de base. A diferença no volume alcançado pela gota pode ser comparada com o ponto marcado pelo número 2. O ponto 3 marca o contato da gota com a poça. Analisando também outros períodos de transferência durante o mesmo ensaio, fica evidente a existência de um atraso entre momento do curto e o início do pulso de corrente. Como a impedância do circuito é reduzida no momento do curto, mesmo trabalhando com o controle de corrente verifica-se a presença de um pico de corrente nesse instante. O controle da fonte recupera o valor de base para, em seguida, aplicar o pulso do curto. Em média, o valor medido para o atraso no pulso foi de 0,4 ms. Na imagem marcada pelo ponto 4 ainda não se tem o início do pulso de corrente. Nela pode-se perceber que, com auxílio das forças relacionadas com a tensão superficial o material fundido da gota já começa a se deslocar para a poça, com uma maior área de contato entre as partes. Os frames numerados de 5 a 7 mostram a estricção da gota que é agora impulsionada com o aumento no valor da corrente, provocando a ruptura da ponte metálica e abertura do arco no instante 8, mesmo antes de se inverter o movimento do arame. O arco é reaberto durante a corrente de pulso, o que pode ser visto pelo brilho correspondente ao arco da imagem 8. A pressão do arco gerada nessa fase causa uma depressão na poça metálica provocando um movimento oscilatório do material fundido assim que a corrente é reduzida. O arame encontra-se parado e, com a oscilação da poça o contato entre as partes acaba sendo reestabelecido. É o que pode ser observado nas imagens marcadas do 8 ao 12. Na sequência dos frames, a ponte metálica é desfeita assim como ocorre no modo sinérgico para o alumínio, com o retorno do arame a partir do frame 12,

estricção gerada em função do movimento de recuo e abertura do arco com baixa corrente, mostrada no frame 15.

Apesar de o resultado obtido com os parâmetros referentes à Va de 4 m/min terem sidos melhores do que os de 5 m/min, verifica-se que a inserção do pulso de corrente durante o curto aumentou consideravelmente a instabilidade da transferência metálica. Sob essas condições, a ruptura da ponte metálica acaba ocorrendo de forma precipitada e com altos valores de corrente, o que contribui para variações no comprimento do arco, respingos e fumos.

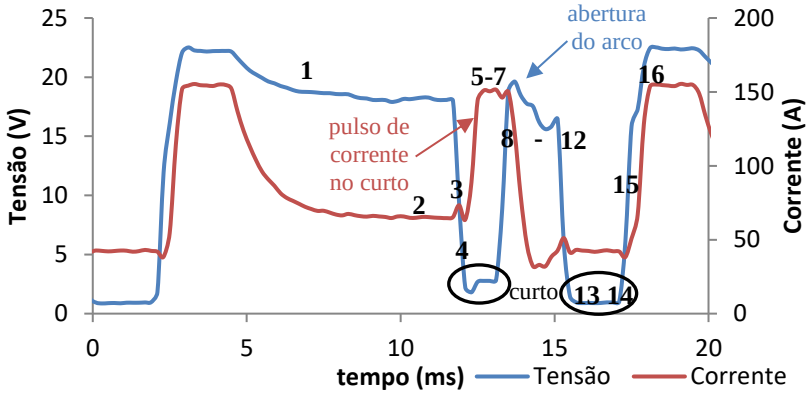


Figura 90 – Abertura de arco durante o pulso de corrente do curto-circuito na soldagem com alumínio ER4043, para a regulagem Va = 4 m/min

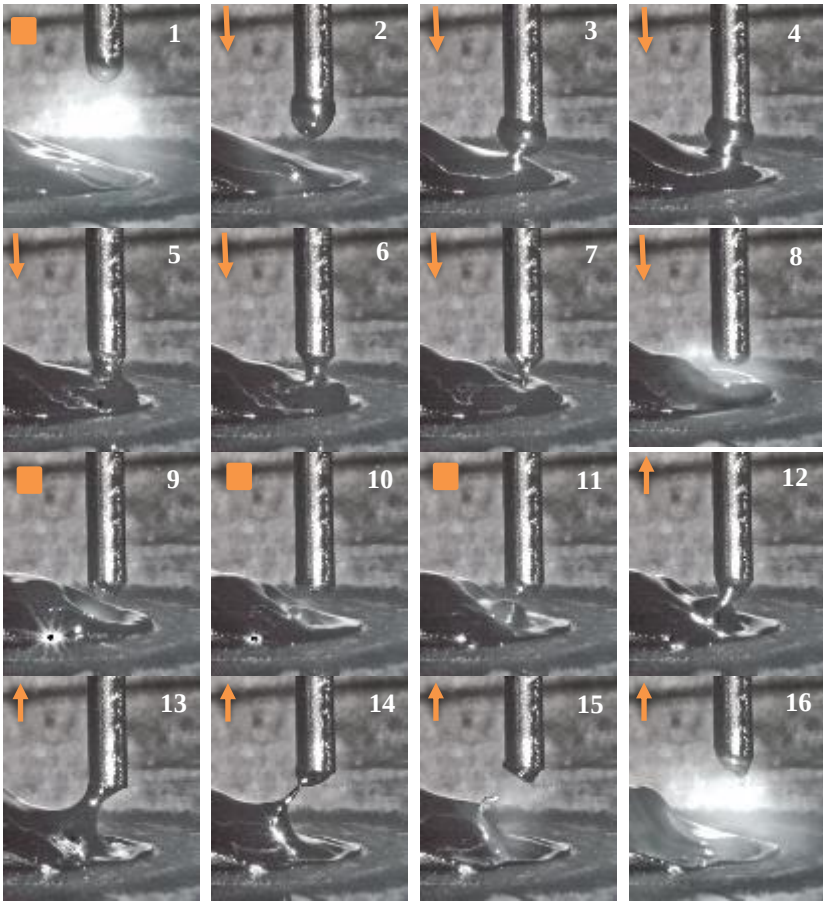


Figura 91 – Frames de filmagem de alta velocidade correspondentes ao oscilograma da Figura 90

5.3.2. Soldando aço sem pulso durante o curto-circuito

A segunda etapa de avaliação aconteceu com o arame de aço carbono ER70S-6. Toda a comparação ocorreu inicialmente com base nos parâmetros definidos pelo programa sinérgico G3Si, na velocidade de arame de referência 5 m/min. A Figura 92 mostra os oscilogramas de tensão e corrente para essa configuração, onde verificou-se uma

frequência de transferência próxima de 88 Hz, com uma velocidade de arame média de 3,8 m/min e uma corrente média de 159 A.

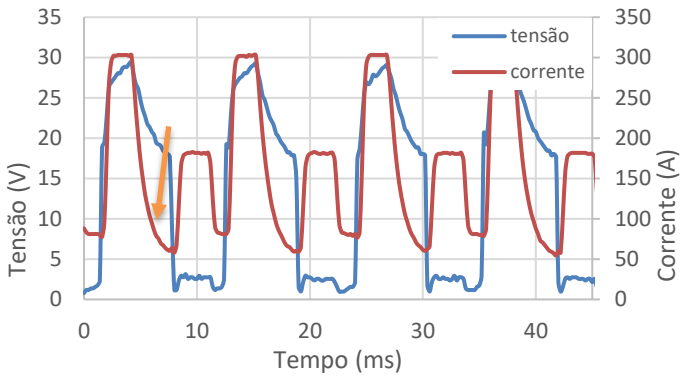


Figura 92 – Oscilogramas de tensão e corrente para soldagem com arame de aço ER70S-6 e programa sinérgico de aço G3Si, Va regulada = 5 m/min

A substituição dos parâmetros no programa sinérgico do alumínio viabilizou a soldagem com aço sem o pulso de corrente. Todavia, a dificuldade aqui foi novamente a tentativa de se manter as mesmas condições em ambos ensaios, de modo a se ter uma análise comparativa nas condições mais próximas possíveis. Como já citado anteriormente, isso se deve ao fato de o equipamento CMT limitar o acesso do usuário aos parâmetros do processo, mesmo no modo de otimização do sinérgico. Quando foram simplesmente mantidos os mesmos valores em termos de corrente, o que se obteve foi uma frequência de transferência de 47 Hz, que está muito abaixo da originalmente configurada para o aço. Além disso, houve uma redução significativa da velocidade de arame média, agora em 2,1 m/min, para uma corrente média de 86 A. A Figura 93 mostra os oscilogramas de tensão e corrente obtidos. A primeira observação é quanto ao tempo correspondente a corrente de base (I_sc_wait). Além de não se ter a corrente de pulso durante o curto-circuito, o longo tempo que o processo se manteve em corrente de base contribuiu para que a corrente média resultante tivesse seu valor reduzido com relação ao sinérgico original. E como consequência, a média de velocidade de arame também foi menor. Observa-se também que a característica de descida da corrente após o tempo de pulso é diferente para as duas situações (seta laranja na Figura 92 e Figura 93). No sinérgico original do aço, a descida da corrente de pulso assume um

comportamento mais suavizado para os valores próximos à corrente de base. No sinérgico do alumínio essa função não está disponível.

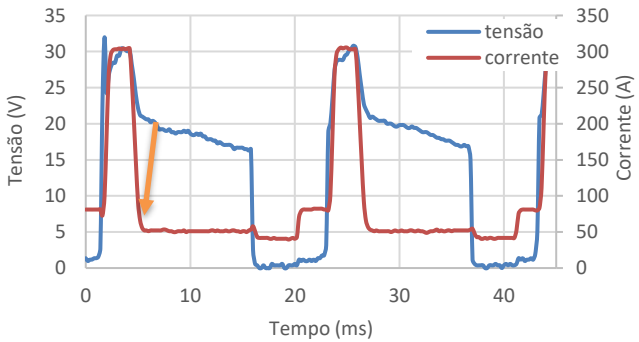


Figura 93 – Oscilogramas de tensão e corrente para soldagem com arame de aço ER70S-6 e programa sinérgico de alumínio adaptado

Apesar de terem sido feitas algumas tentativas de se reduzir o tempo de arco aberto para aumentar a frequência, sobretudo o tempo de duração da corrente de base com alteração no parâmetro chamado de vd_sc_wait, o resultado ainda permaneceu aquém do esperado. Dessa forma, a análise comparativa para os dois casos apresentados acaba sendo prejudicada em alguns aspectos.

A estabilidade na transferência obtida com o sinérgico original do CMT para aço carbono (versão que utiliza o pulso durante o curto) pode ser constatada pela baixa dispersão nas linhas traçadas pelo ciclograma de U x I apresentado na Figura 94 A. De um modo geral o ciclograma traçado para a configuração sem pulso de corrente, Figura 94 B, também possui uma boa regularidade. O principal ponto de desvio que foi observado para esse caso ficou, principalmente, no instante da abertura do arco, conforme região indicada na mesma figura.

Avaliando os resultados obtidos com a filmagem de alta velocidade percebe-se que, quando não foi aplicado o pulso de corrente no curto, a abertura do arco aconteceu de forma mais abrupta, com a projeção de salpicos finos no momento de ruptura da ponte metálica. A Figura 95 mostra um evento de abertura nas condições com e sem pulso de corrente, destacando os salpicos gerados para o segundo. Em ambos os casos, os níveis de energia que foram submetidas a poça e a gota são diferentes. Sendo assim, características físicas do material fundido como a viscosidade e a tensão superficial, que sofrem influência direta da temperatura, também se alteram, provocando comportamentos diferentes

nas duas situações. A imposição de um pulso de corrente durante o curto contribui para a manutenção ou aquecimento da porção fundida, e isso pode ser um fator determinante para o comportamento observado na ruptura da ponte metálica.

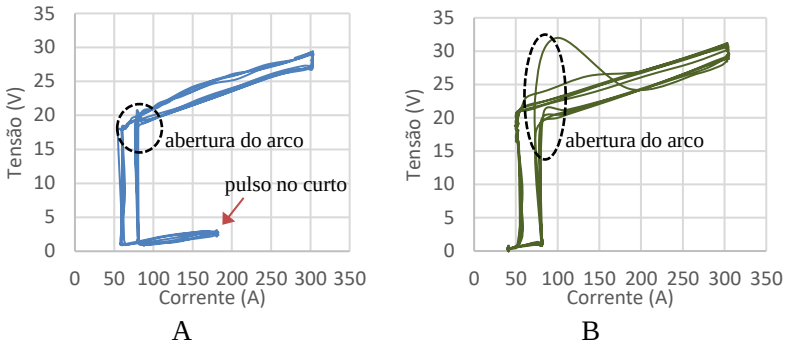


Figura 94 – Ciclogramas de tensão x corrente obtidos na soldagem de aço carbono durante 5 eventos de transferência; A – com pulso de corrente no curto; B – sem pulso no curto

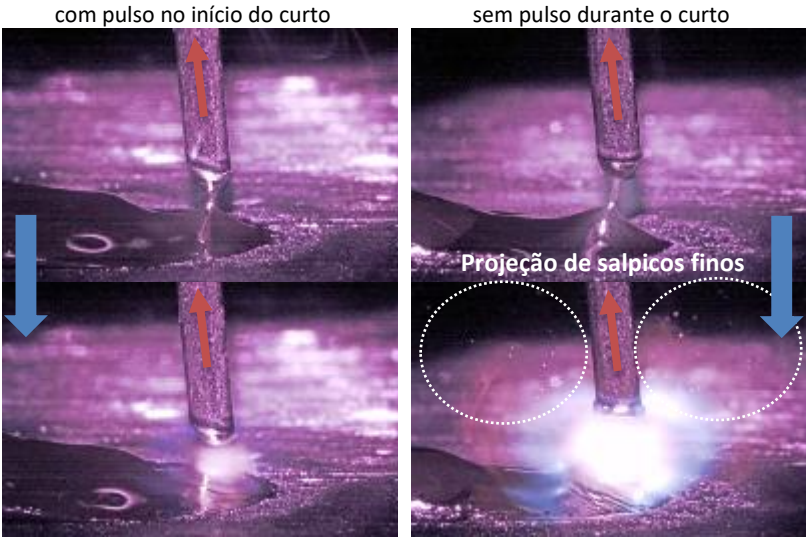


Figura 95 – Instante de abertura do arco para os ensaios com e sem pulso de corrente no curto circuito

Como colocado anteriormente, outras observações poderiam ser ressaltadas, entretanto, as diferentes condições obtidas em termos de frequência de transferência, diâmetro de gota, corrente média, velocidade de recuo do arame, entre outras, podem influenciar no resultado observado e conduzir a conclusões equivocadas. Um exemplo seria a observação de que, durante toda a filmagem realizada com o modo sem pulso de corrente, a ponte metálica acabou sendo mais "esticada" do que na versão com o pulso, ou seja, o arame precisou recuar mais para promover a abertura do arco. A diferença na distância pode ser percebida no comprimento da ponte metálica mostrada na Figura 95.

O trabalho de Sun et al. [71] cita que o pulso de corrente pode contribuir com a transferência metálica devido à estricção promovida na coluna de material fundido. Para o ensaio realizado com pulso de corrente, foram avaliados os momentos da transferência em que o arame parou de avançar sobre a poça, o que coincide com o final do pulso de corrente. Nesse instante a porção fundida de material está submetida as forças eletromagnéticas de maiores intensidades geradas com o pulso de corrente, e ainda não se tem a ação da componente de força referente ao retorno do arame. Na Figura 96 é possível observar a existência de um empescoçamento no material, mesmo antes de se iniciar o recuo do arame. Cabe ressaltar que a estricção da ponte metálica não é resultado exclusivo do efeito causado pelas forças eletromagnéticas, mas que isso de fato pode ser um agente contributivo. Esse efeito pode ocorrer sob a atuação de outras forças, como por exemplo, as forças atuantes em função da tensão superficial do material, assim como mostrado anteriormente na Figura 14.

Além de toda a influência dos fatores até então discutidos, observa-se que o nível de empescoçamento apresentado ao final da corrente de pulso tem também dependência da posição relativa entre a parte sólida do arame e da poça. Quando o conjunto de parâmetros de velocidade de avanço e recuo do arame proporciona que a extensão sólida do arame mergulhe ultrapassando o nível da poça, não será possível associar a estricção da ponte metálica como uma vantagem para o uso do pulso durante o curto, simplesmente por que não será possível identificar esse efeito.

Para a configuração de parâmetros ensaiadas na soldagem de aço sem o pulso de corrente no curto, os resultados obtidos com a filmagem mostraram que, no momento da parada do arame, não é possível identificar um efeito de estricção da poça. A Figura 97 mostra três eventos de transferência como exemplo.

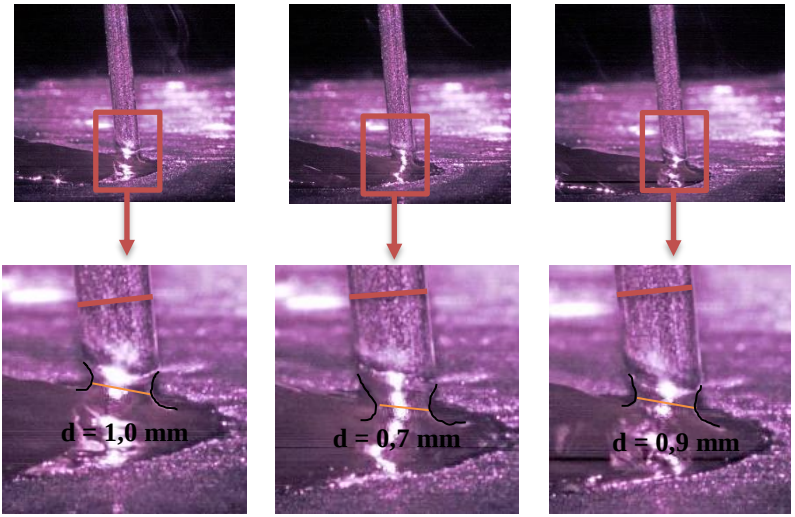


Figura 96 – Estricção da ponte metálica em instante anterior ao retorno do arame no programa sinérgico de aço carbono, com pulso de corrente (arame de aço carbono)

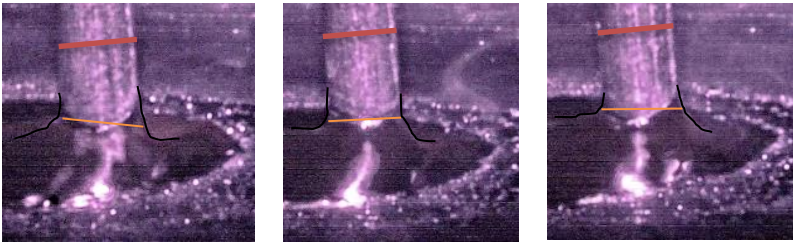


Figura 97 – Comportamento da ponte metálica em instante anterior ao retorno do arame no programa sinérgico de alumínio AlSi5, sem pulso de corrente (arame de aço carbono)

A adição do pulso de corrente durante o curto contribui para o aumento no valor da corrente média e no pré-aquecimento do arame causado pelo efeito joule, o que na soldagem de aço carbono, passa a ser relevante. Conforme discutido no item 2.3, durante o curto-circuito o aquecimento do arame por efeito joule é considerado uma das principais fontes contribuintes para a fusão do eletrodo.

Uma rápida análise pode ser feita com relação as formas de onda com e sem pulso de corrente no curto. A Figura 98 mostra o oscilograma obtido para uma Va regulada em 5 m/min (já apresentado na Figura 92), sobreposto a uma curva hipoteticamente idêntica em que apenas foram removidos os pulsos de corrente no curto. Os valores de corrente (média e eficaz) para os dois casos são apresentados na Tabela 17. Observa-se que a inserção do pulso de corrente pode incrementar de maneira significativa o valor das correntes médias e eficazes, principalmente quando se avalia isoladamente o tempo de curto. Nesse instante, o acréscimo em termos de corrente eficaz chega a 78%. Sendo assim, em concordância com a equação 8 que separa a parcela correspondente ao tempo de curto, a inserção do pulso de corrente no curto pode de fato incrementar o resultado do pré-aquecimento do arame obtido pelo efeito joule. Poder-se-ia fazer uma analogia do momento de curto no CMT com processo TIG *hot wire*, onde o arame é previamente aquecido por efeito joule e, como resultado, se obtém uma capacidade de fundir maior quantidade de arame para uma mesma corrente no arco.

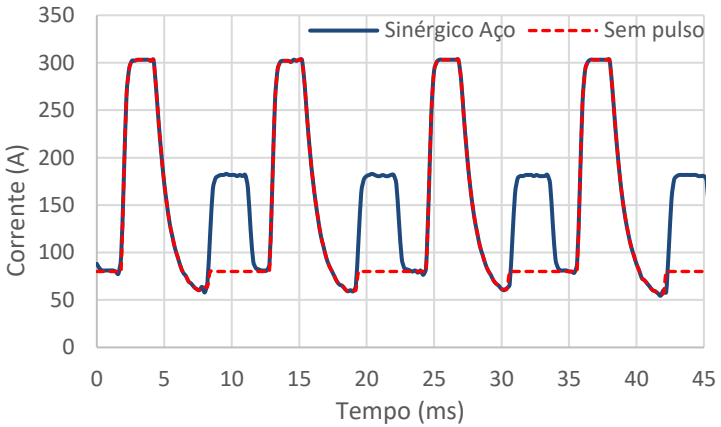


Figura 98 – Comparativo de formas de onda com e sem pulso de corrente durante o curto-circuito

Tabela 17 - Valores calculados para as configurações com e sem pulso de corrente na soldagem de aço carbono, referentes à Figura 98

	Sem pulso	Com pulso	Aumento
I_m (A)	134	159	19%
I_{ef} (A)	146	179	23%
$I_{m\ arco}$ (A)	179	179	-
$I_{m\ curto}$ (A)	80	135	69%
$I_{ef\ arco}$ (A)	205	205	-
$I_{ef\ curto}$ (A)	80	143	78%
ta (ms)	6,2	6,2	-
tc (ms)	4,8	4,8	-

5.3.3. Outras discussões

Durante a realização de inúmeros ensaios de soldagem com a versão CMT, em diferentes configurações de material ou níveis energia aplicadas, foram observadas situações em que o resultado apresentado pelo equipamento nem sempre condiz com aquilo que é inicialmente proposto pelo fabricante ou por outros pesquisadores. Obviamente que a apresentação de informações por parte do fabricante inicialmente pode ter um caráter ilustrativo, resumindo ou ocultando um maior detalhamento que, de princípio, pode não interessar o operador do equipamento. A apresentação dos oscilogramas estilizados de tensão, corrente e velocidade de arame no manual do equipamento (Figura 44), chamados pelo fabricante de curvas características, são um exemplo disso. Durante a realização de filmagens de alta velocidade focadas no monitoramento da transferência metálica em soldagens de alumínio verificou-se que, diferentemente do que mostra o oscilograma estilizado de Va, o movimento de avanço do arame tem sua velocidade aumentada assim que termina o tempo de pulso de corrente, o que reduz o tempo de aproximação da gota fundida à peça.

Como forma de monitorar essa característica do programa sinérgico AlSi5, em alguns dos ensaios de soldagem com alumínio apresentados no item 5.3.1 a filmagem de alta velocidade foi direcionada

para o rolete tracionador de arame instalado na tocha. Utilizando uma ferramenta de acompanhamento do movimento chamada *TrackMotion*, disponível no software Motion Studio da câmera IDT, foi possível relacionar o deslocamento de um ponto de referência marcado no rolete com o deslocamento de arame, chegando assim a valores estimados para a velocidade de avanço e recuo na tocha. Uma das vantagens associadas a isso foi a possibilidade de sincronismo dos dados exportados pelo *TrackMotion* com a aquisição de tensão e corrente. O resultado obtido na forma de oscilograma é apresentado na Figura 99.

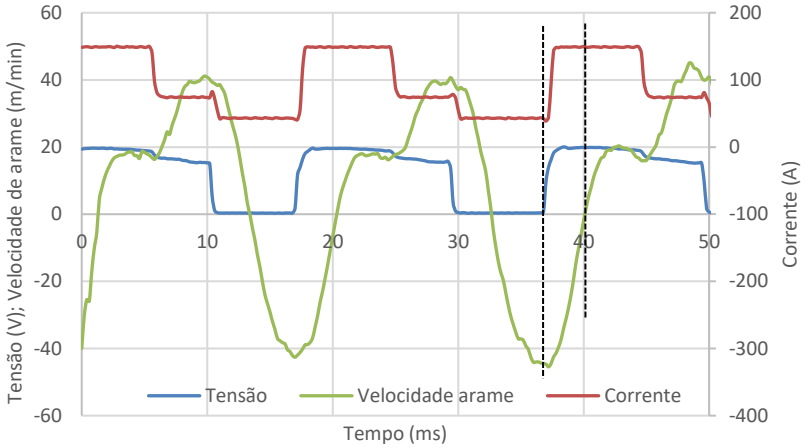


Figura 99 – Oscilogramas de tensão, corrente e velocidade de arame na tocha, programa sinérgico de alumínio AlSi5, arame ER4043 de 1,2mm e Va regulada em 5 m/min

O oscilograma de velocidade de arame está representado em verde na figura acima. Os valores positivos correspondem ao movimento de avanço e os valores negativos correspondem ao recuo. Durante o avanço, observa-se que a velocidade de arame foi estabelecida em dois patamares distintos. O primeiro valor é mantido enquanto a fonte impõe a corrente de pulso na fase de arco (Iboost), instante em que a velocidade de arame atingiu valores próximos a 20 m/min. Com o término do pulso da corrente, a velocidade de arame foi aumentada, atingindo valores próximos de 40 m/min (o dobro do patamar anterior). Durante o recuo, a velocidade monitorada também ficou próxima dos 40 m/min, mas em função da ruptura da ponte metálica, antes mesmo de ser mantida em um

valor constante já se inicia uma nova inversão do movimento. Em média, o tempo que o rolete levou para desacelerar do momento da detecção do curto circuito até a sua parada foi de 3,3 ms. A taxa de aceleração e desaceleração durante as inversões de movimento foi estimada em valores próximos a 315 m/s². Quando ocorre o aumento na velocidade de avanço após a corrente de pulso, fica visível no gráfico uma menor inclinação na curva de velocidade, resultado de uma aceleração próxima a 165 m/s².

Aproveitando-se da mesma estratégia de filmagem e coleta de dados no *TrackMotion*, foram plotados os oscilogramas de tensão, corrente e Va também para o sinérgico G3Si. Para tanto, utilizou-se a filmagem realizada durante os ensaios de avaliação do parâmetro correção dinâmica, tratados no item 5.2.1, com arame ER70-6 de 1,2 mm, na regulagem de Va = 4 m/min e CD = +5. O resultado obtido pode ser visto na Figura 100. Diferentemente do programa sinérgico do alumínio mostrado anteriormente, a velocidade de arame teve comportamento semelhante ao indicado pelo fabricante nas “curvas características”. A velocidade de avanço atingiu valores próximos de 25 m/min. Para a velocidade máxima obtida no recuo observa-se que os valores alcançados foram ligeiramente superiores do que no avanço, ficando em uma faixa entre 25 e 30 m/min. Essa diferença entre as máximas velocidades de avanço e recuo não pode ser observada no cálculo médio da velocidade, cujos resultados foram apresentados na Tabela 15. A taxa de aceleração e desaceleração nas inversões de movimento ficou em uma média de 275 m/s².

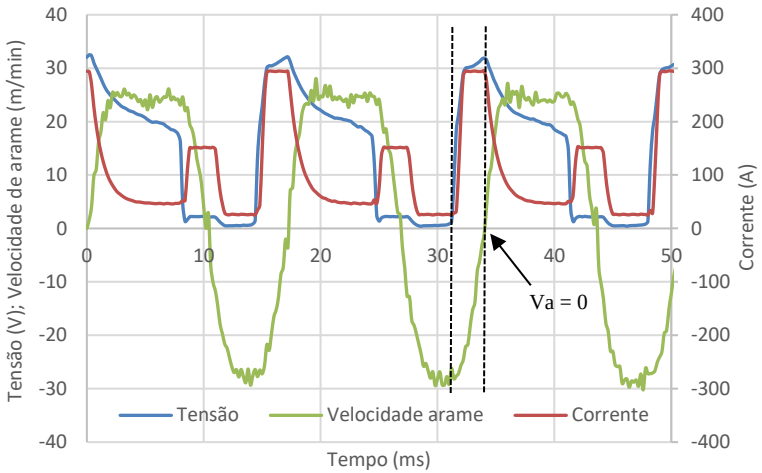


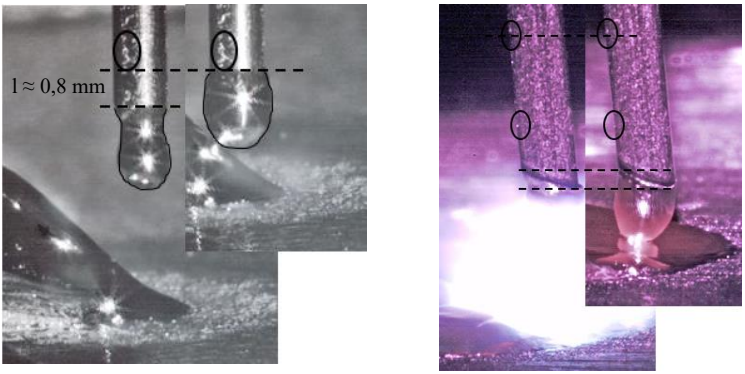
Figura 100 – Oscilogramas de tensão, corrente e velocidade de arame na tocha, programa sinérgico de aço G3Si, Arame ER70S-6 de 1,2 mm e Va regulada em 4 m/min (CD = +5)

Após a abertura do arco, o arame que está sendo recuado começa a desacelerar, com o objetivo da inversão no movimento. Uma observação feita para os dados coletados com o programa de aço é o fato de que, no princípio do o movimento de avanço de arame, a corrente já completou a etapa de pulso e inicia o decaimento para a corrente de base. Diferente situação ocorre no programa de alumínio que possui um maior tempo para a corrente de pulso. Os instantes citados estão marcados por linhas tracejadas na Figura 99 e na Figura 100. Devido ao fato de os tempos de desaceleração e aceleração serem maiores que o próprio tempo de pulso programado no sinérgico do aço, verifica-se que dessa forma não haveria possibilidade de se implementar patamares de velocidade de arame diferentes para a fase de pulso e de base. Sendo assim, o programa para o aço carbono acabou sendo configurado pelo fabricante com somente um patamar de Va durante o avanço.

Logo no início do pulso de corrente, enquanto o arame ainda está recuando, a gota de material fundido já está em formação. Para o caso do alumínio, mesmo após o término da fase de pulso e durante toda a corrente de base (I_sc_wait) foi observado que o arame ainda é consumido pela gota em crescimento à medida que se aproxima da peça. O fato pôde ser observado na filmagem de alta velocidade realizada nos ensaios de alumínio com Va regulada em 5 m/min (item 5.3.1). O mesmo comportamento não é observado na soldagem com arame de aço. A

Figura 101 mostra um comparativo para os dois casos. As regiões circuladas em preto nas imagens mostram irregularidades visíveis na superfície do arame que puderam ser usadas como referência para a comparação. Para ambos os casos, o primeiro frame mostrado se refere ao término da corrente de pulso e o segundo frame indica o instante do curto circuito. No caso do alumínio registrado em A, um comprimento de arame de aproximadamente 0,8 mm foi adicionado à gota mesmo após o pulso de corrente. Na imagem B referente ao aço carbono, verifica-se que a porção sólida de arame permanece praticamente inalterada.

Tendo em vista o consumo do arame de alumínio mesmo durante a corrente de base, um dos motivos para que o programa sinérgico de alumínio aumente a velocidade de avanço nessa fase seria o fato de, com isso não se permitir o demasiado crescimento da gota.



A **B**

Figura 101 – Comportamento da fusão do arame na formação da gota durante corrente de base (I_sc_wait); A – Soldagem com alumínio ER4043 de 1,2 mm ; B – Arame ER70S-6 de 1,2 mm

5.4. DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA PARA SOLDAGEM MIG/MAG AD (ETAPA 4)

A etapa de desenvolvimento do sistema para soldagem MIG/MAG AD é descrita a seguir, iniciando pelos testes realizados com os diferentes modelos de acionamentos citados no item 4.1.4, que levaram a montagem dos protótipos de tocha. Com a verificação da viabilidade de utilização de um dos sistemas de acionamento avaliados serão então abordadas as estratégias de controle implementadas e a realização de testes de soldagem para a validação do trabalho.

5.4.1. Avaliação dos sistemas de acionamento

O primeiro ensaio realizado foi o teste sem carga. A análise das imagens dos eixos dos motores resultou na informação dos máximos ângulos de rotação que cada modelo foi capaz de fornecer em função da frequência de inversão solicitada. Os valores são apresentados na Tabela 18. Para estimar o deslocamento linear de arame correspondente as variações angulares, considerou-se o diâmetro de um rolete tracionador de arame de um modelo comercial e fez-se uma relação de proporção direta entre deslocamento angular e linear, obtendo os valores exibidos na última coluna da tabela.

Tabela 18 – Resultado do teste de inversão com motor a vazio

Motor	Frequência de inversão (Hz)	Variação angular média (º)	Estimativa de deslocamento linear (mm)
Servomotor CA 100 W Panasonic	40	83	21,6
	50	61	15,8
	60	46	12,0
Servomotor CA 200 W Panasonic	40	85	22,1
	50	59	15,4
	60	47	12,1
DC com escovas Pittman	40	56	14,4
	50	29	7,5
	60	21	5,4
Motor de passo Kalatec	40	23	6,0
	50	15	4,0
	60	9	2,3

Com base em resultados de filmagens de alta velocidade, onde foram observados os movimentos de avanço e recuo de arame de uma versão comercial do processo MIG/MAG com alimentação dinâmica, convencionou-se que o valor mínimo de deslocamento linear necessário para o bom funcionamento do sistema deveria ser de 5 mm. Sendo assim, avaliando os dados apresentados na Tabela 18, é notório que os motores do tipo servo CA apresentaram uma maior capacidade de deslocamento angular em função da frequência de inversão. Mesmo para a frequência de 60 Hz, os servomotores CA resultariam em um deslocamento linear na faixa de 12 mm, o que representa uma boa margem sobre o limite mínimo de 5 mm que fora convencionado para este trabalho.

Para o caso do motor DC testado, a média de deslocamento superou o mínimo estabelecido em todas as frequências de inversão. Entretanto, quando submetido à frequência de 60 Hz, o resultado de variação angular para este modelo se mostrou pouco repetitivo, o que depõe contra a confiabilidade do acionamento nessas condições. Além disso, no ensaio realizado o motor ainda não estava sendo submetido a carga, o que de fato poderia prejudicar ainda mais o seu desempenho.

Já para o caso do motor de passo, o único resultado apresentado que ficou dentro do limite de 5 mm estabelecido foi para 40 Hz de frequência, o que tornou seu uso inviável para a construção do protótipo. Sendo assim, o ensaio com carga prosseguiu com a avaliação somente dos dois modelos de servomotores CA. O objetivo era que o teste com carga fornecesse resultados mais próximos do comportamento do sistema de acionamento quando submetido ao processo real. Os resultados do teste são exibidos na Tabela 19. Acrescentou-se nesse ensaio a frequência de inversão de 30 Hz.

Tabela 19 – Resultados do teste de inversão com carga

Motor	**Frequência oscilação (Hz)**	**Velocidade linear média (m/min)**	**Deslocamento linear médio (mm)**
Servomotor CA 100 W Panasonic	30	77	21
	40	65	14
	50	61	10
	60	51	7
Servomotor CA 200 W Panasonic	30	88	24
	40	71	15
	50	60	10
	60	39	5

O resultado apresentado pelos dois motores em termos de deslocamento linear de arame foi bastante similar, se enquadrando no limite mínimo previamente estabelecido. Com isso, a seleção do modelo para a montagem do primeiro protótipo também levou em considerações outras características dos motores. Tendo em vista a possibilidade de evolução do protótipo para um modelo que permitisse inclusive a soldagem manual, é desejável que o motor seja o menor possível. Outra especificação avaliada foi em relação ao menor momento de inércia do rotor, o que afeta diretamente o esforço que o motor deve realizar em cada inversão de sentido. A tendência é que para altas frequências de inversão, quanto menor o momento de inércia menor seria o tempo de resposta (desaceleração e aceleração) do motor. Sendo assim, o modelo selecionado para a montagem no primeiro protótipo concebido foi o servo CA Panasonic de 100 W de potência.

5.4.2. Definição de Estratégias de Controle

O núcleo de controle e processamento do sistema de soldagem MIG/MAG AD foi concentrado no mesmo processador ARM utilizado pela fonte de soldagem Digiplus IMC. A integração com o driver de potência do motor responsável pela movimentação dinâmica do arame foi feita por meio de saídas digitais da placa controladora da fonte, programadas para enviar ao driver os sinais de comando do tipo passo e direção (STEP/DIR).

Para auxiliar na definição das estratégias de controle, o procedimento de soldagem foi inicialmente dividido em três etapas: abertura, soldagem e finalização. Durante o momento da primeira abertura do arco, o programa da fonte é dotado de estratégias que viabilizem a abertura do arco de maneira suave, evitando situações em que o arame acabe grudando na peça. A etapa de soldagem corresponde à lógica implementada para a composição das formas de onda de velocidade de arame, corrente e tensão, sendo essa a etapa responsável pelo controle da transferência metálica, ou seja, da soldagem propriamente dita. Para evitar situações em que o arame fique aderido à poça no término da solda, foram implementados algoritmos também para a etapa de finalização. A Figura 102 mostra a sequência das etapas ocorridas em um procedimento de soldagem.

Figura 102 – Fluxograma representativo da definição de etapas durante o procedimento de soldagem

O algoritmo correspondente à etapa de abertura do arco está sendo mostrado na Figura 103. O início é dado com o recebimento do sinal de disparo recebido pela fonte, quando o arame começa o movimento de avanço até a detecção do curto-circuito com a peça. Durante essa etapa, a velocidade de aproximação pré-definida é geralmente baixa, com valores menores que 4 m/min. Assim que é detectado o curto circuito, o arame é comandado a retornar por um tempo bastante curto (5 ms), com o objetivo de simplesmente aliviar a pressão do arame sobre a peça, mas sem desfazer o contato. Com o arame parado é aplicada uma rampa de corrente para que seja promovido o aquecimento do arame, essencialmente na região de contato com a peça. Ao término da rampa, o arame inicia o movimento de recuo por um tempo pré-definido (2,5 ms), com a corrente mantida no valor correspondente ao final da rampa. Caso seja detectada a abertura do arco após esse tempo, é então aplicada uma segunda rampa de corrente que irá causar a fusão do arame, com a formação de uma gota em sua extremidade. Ao final da rampa o arame começa a avançar, a corrente é setada no valor de base e, então, é dado início a etapa de soldagem. Se a abertura não for detectada na primeira tentativa, a potência da fonte é desativada e o arame reinicia o movimento de avanço em busca do curto-circuito.

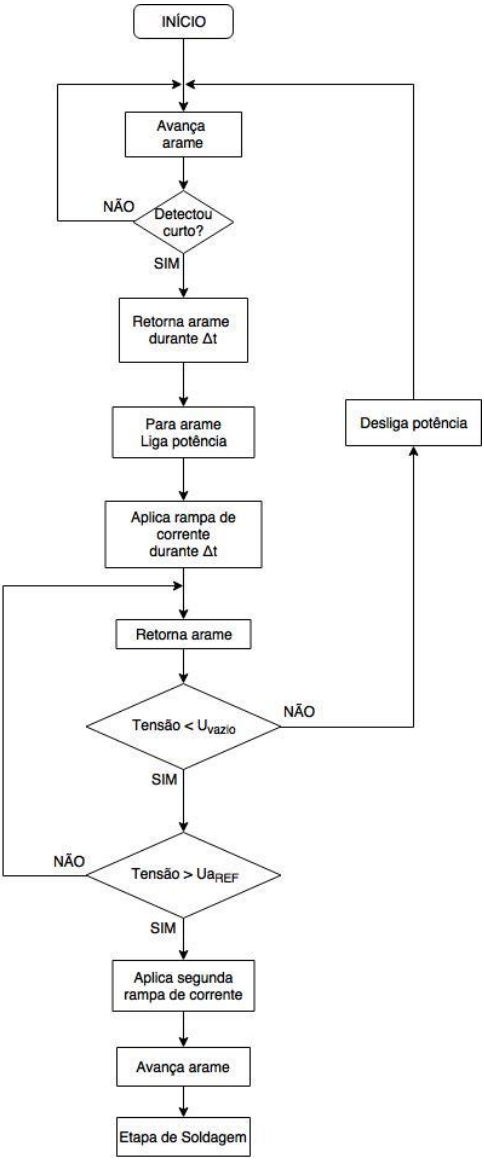


Figura 103 - Fluxograma correspondente à etapa de abertura do arco

A Figura 104 apresenta o fluxograma corrrepondente à etapa de soldagem. Após o primeiro evento de abertura do arco, o arame inicia o movimento de avanço em direção a peça, com o objetivo de promover a transferência metálica do material fundido na extremidade do arame. A corrente é mantida no valor de base (Iba) até a detecção do curto-circuito, identificado assim que a tensão lida pela fonte for menor do que a tensão de referência do curto (Uc). Em seguida, o controle comanda o driver do motor para iniciar movimento de recuo com velocidade (Vr) e, após o tempo de atraso (tacc), comanda a corrente para o valor correnspondente ao pulso no curto (Ipc). Passado o tempo de pulso no curto (tpc), a corrente é setada para o valor de base no curto (Ibc). O arame continua sendo comandado no sentido de afastar da poça, até o momento de detecção da reabertura do arco, quando a tensão lida pela fonte for maior do que a referência de abertura (Ua). A partir desse ponto e após um tempo de atraso possível de ser regulado tanto para a corrente (tai) como para o arame (taa), o controle comanda o driver do motor para a inversão do movimento, com velocidade de avanço (Vap), ao mesmo passo que é imposto o valor de corrente correspondente ao pulso durante o arco (Ipa). Passado o tempo de pulso no arco (tpa) e caso não seja identificado nenhum curto-circuito durante esse tempo, a corrente passa a ser comandada para o valor de base no arco (Iba), com velocidade de avanço igual a (Vab). O ciclo reinicia com a ocorrência do próximo curto-circuito.

Algumas condições de contorno foram estabelecidas a fim de evitar interrupções no processo ou demasiadas instabilidades, a saber:

1. Caso o tempo de base ultrapasse o valor limite previamente definido (30 ms), o que pode significar algum problema no acionamento ou travamento no arame, o controlador simplesmente desativa a potência e o motor, interrompendo a solda para verificação do sistema;
2. Caso o tempo de curto-circuito ultrapasse o limite pré-estabelecido (30 ms), o que pode significar que o arame ficou grudado na peça, a velocidade de retorno passa a ser reduzida e a corrente de curto passa a ser imposta em um alto valor (300 A), de modo a promover a fusão do arame para o rompimento do contato com a peça e reabertura do arco;
3. Caso ocorra um curto-circuito durante o momento de pulso de corrente no arco, o controle pula a etapa de base no arco e inicia as ações referentes ao curto, com o comando para o retorno do arame e imposição da corrente de pulso no curto.

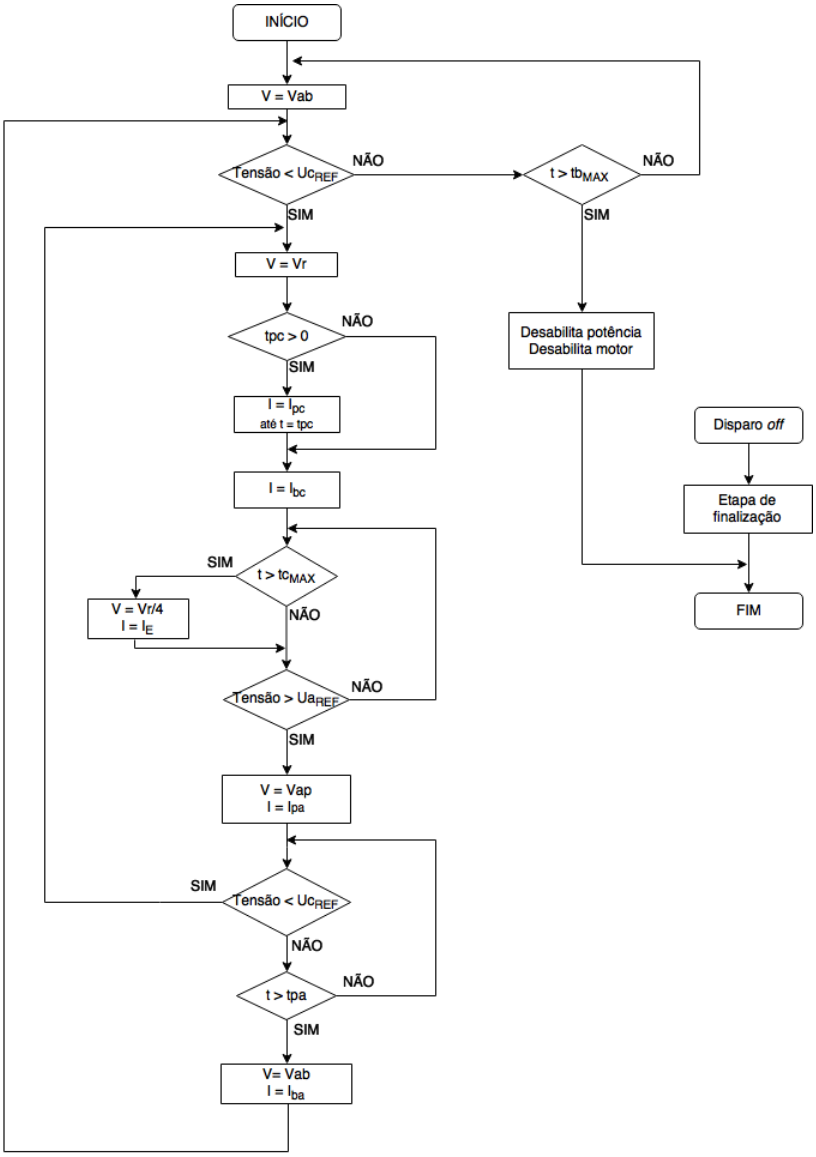


Figura 104 - Fluxograma correspondente à etapa de soldagem

Durante a etapa de soldagem, em qualquer momento que o controlador da fonte receber a informação para a interrupção da solda (disparo *off*), o programa é redirecionado para a etapa de finalização mostrada na Figura 105. O objetivo é evitar que, por uma coincidência, o comando de “desliga solda” aconteça durante a etapa de curto-circuito. Nesses casos, a simples interrupção do processo permitiria que o arame permanecesse em contato com a poça, ficando grudado devido a sua solidificação. Sendo assim, a partir do momento que a fonte recebe o comando para desligar a solda, a primeira ação do controlador é direcionar o programa para o que seria o último evento de curto circuito. Ao final do curto, com o retorno do arame e reabertura do arco, a potência da fonte e o servomotor são desativados.

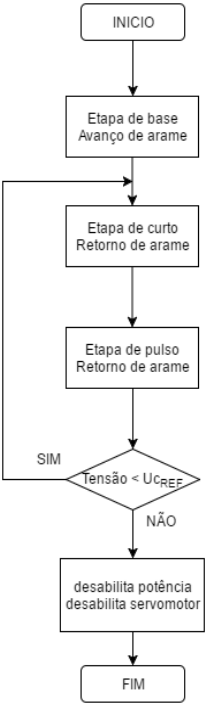


Figura 105 - Fluxograma correspondente à etapa de finalização

5.4.3. Ensaios de Soldagem

A definição das estratégias de soldagem mostradas no item anterior somente pôde ser testada e validada com a realização de testes de soldagem que ocorreram de forma concomitante a escrita do programa. A verificação da lógica e dos algoritmos desenvolvidos foi inicialmente avaliada utilizando a primeira versão do protótipo de tocha, adaptado na estrutura do cabeçote alimentador de arame da fonte IMC. Os algoritmos do controle apresentados foram moldados conforme observações e problemas observados no decorrer dos ensaios de soldagem. A seguir estão apresentadas situações e resultados obtidos com as duas versões de protótipo desenvolvidas.

5.4.3.1. Resultados com primeiro protótipo

Uma das principais dificuldades associada com o desenvolvimento da versão MIG/MAG AD está no controle do avanço e recuo do arame em frequências elevadas. Durante a etapa inicial de testes, enquanto o software de controle ainda estava em construção, a velocidade de arame regulada para o avanço e recuo era configurada por meio de variáveis adimensionais que simplesmente alteravam a frequência enviada pelo trem de pulsos do sinal *step*. Por esse motivo, ainda não se tinha nesses ensaios um valor de velocidade de arame regulada na fonte em “m/min”. Também nesses ensaios, a medição da velocidade de arame consumida (Va média) era prejudicada pelo fato de se ter uma pequena distância entre o rolo de arame e o tracionador da alimentação dinâmica, fazendo com que o movimento de recuo do arame chegasse até o sistema de medição da maleta SAP, acarretando em erros de medição. Sendo assim, os ensaios realizados tiveram a regulagem das velocidades de arame determinadas de forma empírica.

No início do desenvolvimento do programa de controle, os ensaios de soldagem foram realizados utilizando o arame de alumínio ER5183, com 1,2 mm de diâmetro. Por esse motivo, os parâmetros definidos para a etapa de abertura foram configurados de forma a apresentar o melhor resultado para o uso com esse tipo de arame. A Figura 106 exibe os oscilogramas de tensão e corrente obtidos durante o primeiro evento de abertura do arco, em um depósito realizado com o protótipo 1. A sequência de eventos segue a estratégia representada pelo fluxograma da Figura 103. Para promover a abertura do arco, a fonte comanda o avanço do arame sobre a peça até o acontecimento do curto-circuito, marcado no

oscilograma com a queda da tensão para valores próximos a zero (0 V). Na figura é possível verificar que, após esse momento, é imposta uma rampa crescente de corrente, por um tempo previamente definido no programa. O arame permanece parado para que o aquecimento da região de contato promovido pela corrente elétrica contribua com a abertura do arco. Passado o tempo de subida da primeira rampa de corrente, o arame começa a ser recuado até que o contato com a peça seja desfeito. Nesse instante a leitura de tensão realimenta o controle da fonte com a situação da abertura do arco. Em seguida a corrente é comandada para um segundo patamar, de maior intensidade, permanecendo neste valor por um tempo pré-definido, promovendo a fusão do arame e um maior aquecimento da peça para o início de formação de uma poça de material fundido. Por fim, a corrente é comandada para o valor de base no arco, o que dá início a etapa de soldagem.

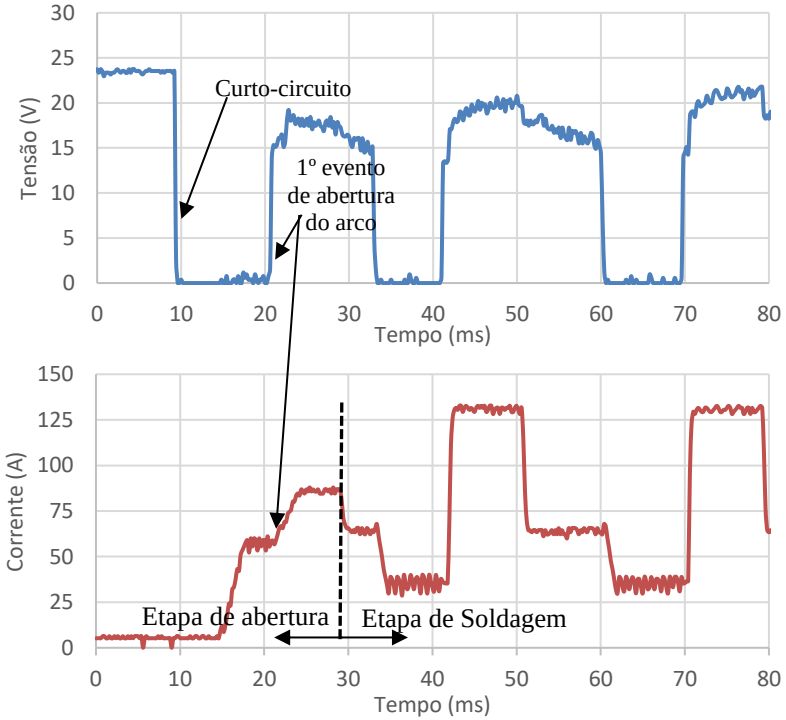


Figura 106 – Oscilogramas de tensão e corrente com destaque para a etapa de abertura

A Figura 107 mostra o oscilograma correspondente ao resultado obtido durante a etapa de soldagem. Nos ensaios com arame de alumínio não foi utilizado o pulso de corrente durante o curto, e os tempos de atraso possíveis de serem regulados ainda não haviam sido implementados. Sendo assim, observa-se na figura que a forma de onda de corrente está definida por apenas três níveis, que correspondem à corrente de pulso no arco, corrente de base no arco e a corrente de curto. Em primeiro momento, a corrente de pulso proporciona a formação da gota metálica. A corrente é então reduzida para a corrente de base, quando, em função da continuidade do avanço do arame, ocorre o curto circuito. Assim que o controle identifica que a tensão medida é menor que a referência identificadora do curto (Uc), a corrente é reduzida para o valor de curto-circuito e o motor é comandado para o movimento de recuo. A identificação da abertura do arco é dada também com base na leitura da tensão e comparação com a tensão de referência de abertura (Ua). Os valores utilizados como referência para o curto e abertura de arco foram 4 e 9 V respectivamente. O valor maior para detecção da abertura do arco é justificado pela possibilidade de interpretação equivocada de abertura caso se estivesse usando um valor mais baixo, já que o empescoçamento da ponte metálica provoca um aumento na resistência do contato e consequentemente, um aumento na tensão (por ser tratar de um a versão do processo com controle de corrente). Após esse momento, o sistema comanda o avanço do arame com a aplicação de um novo pulso de corrente. Observa-se também no oscilograma uma boa repetitividade dos períodos de transferência, que resultaram em uma frequência próxima à 40 Hz.

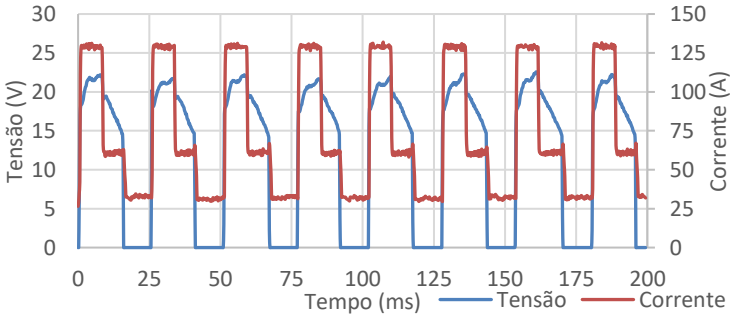


Figura 107 – Oscilogramas de tensão e corrente com destaque para a etapa de soldagem, em depósito feito com arame de alumínio ER5183 com Ø = 1,2 mm, frequência de transferência aproximadamente 40 Hz.

O término da solda é marcado pela etapa de finalização, apresentada pelo oscilograma da Figura 108. Como discutido anteriormente, a principal função da etapa de finalização é garantir que o arame não fique grudado na peça ao final da solda. Assim que a fonte recebe o sinal para o desligamento do arco, o controle comanda a corrente para a etapa de base, realizando a deposição do material fundido por meio do curto e desativando a potência da fonte (I = 0 A) durante a fase de pulso, quando se tem a garantia de que o arame não está em contato com a poça.

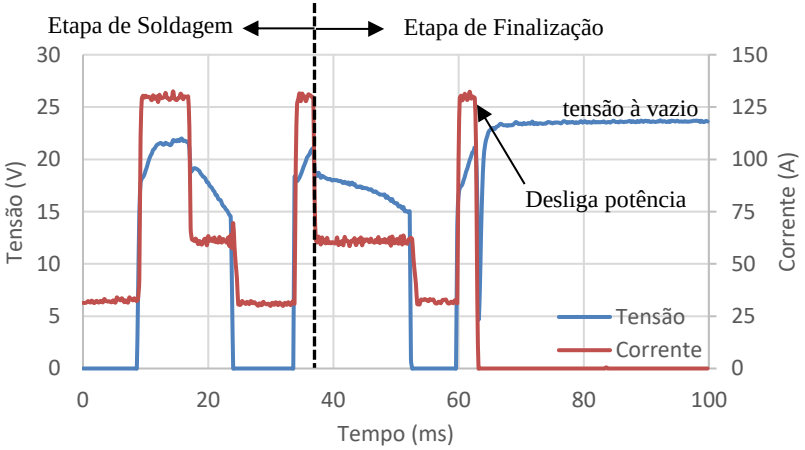


Figura 108 – Oscilogramas de tensão e corrente com destaque para a etapa de finalização

O resultado da soldagem realizada com o arame ER5183 pode ser verificado na Figura 109. A realização de depósitos sobre chapa foi utilizada como forma de avaliar o sistema de alimentação dinâmica construído e sua aplicabilidade no desenvolvimento de pesquisa com o processo MIG/MAG AD. Na Figura 110 é exibido também o depósito feito com o arame ER4043. O objetivo aqui não foi fixado em se obter um depósito com boas características de molhabilidade ou penetração. A intenção foi de verificar a estabilidade no depósito a fim de se comprovar a validade da estratégia de controle utilizada.

Figura 109– Depósito nº1 realizado com arame de alumínio ER5183, com 1,2 mm de diâmetro

Figura 110– Depósito nº2 realizado com arame de alumínio ER4043, com 1,2 mm de diâmetro

Visando avaliar o protótipo também para aço carbono, foram realizadas modificações no software da fonte de maneira que fosse possível a configuração de um tempo de pulso de corrente no início do curto. Esse pulso foi implementado, em princípio, seguindo informações encontradas em versões comerciais do processo, conforme discussões levantadas no item 5.3. Não foi implementado nessa ocasião o controle para o decaimento lento da corrente, o que pode ser observado em programas sinérgicos do CMT. Sendo assim, a taxa de descida da corrente respondia de acordo com a máxima dinâmica disponível na fonte. A imagem da Figura 111 mostra o resultado do depósito feito com arame de aço carbono ER70S-6, e a forma de onda de corrente obtida para a situação regulada pode ser observada no oscilograma da Figura 112. Apesar de se ter uma boa regularidade no depósito e nos períodos de transferência, é possível notar na Figura 111 a presença de alguns respingos que aderiram à chapa.

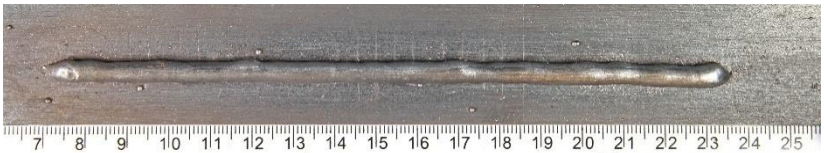


Figura 111 – Depósito nº3 realizado com arame de aço ER70S-6, com 1,2 mm de diâmetro

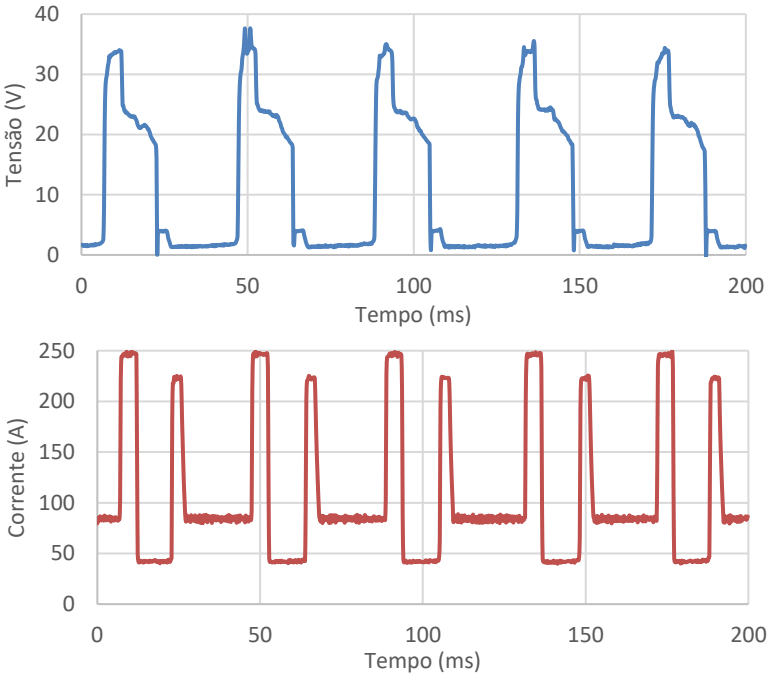


Figura 112 – Oscilogramas de tensão e corrente com destaque para o pulso adicional na etapa de curto, em depósito feito com arame de aço ER70S-6 com Ø = 1,2 mm

A Tabela 20 apresenta os valores regulados para velocidade de arame nos depósitos apresentados na Figura 109, Figura 110 e na Figura 111. O parâmetro regulado tem relação inversamente proporcional com a velocidade de arame, ou seja, quanto maior esse valor menor seria a velocidade de avanço do arame. Os valores médios de corrente e tensão apresentados na tabela foram obtidos com o SAP, e a frequência de

transferência calculada com base nos períodos obtidos com os oscilogramas.

Tabela 20 – Parâmetros de referência reguladas para as velocidades de avanço e recuo e resultados da aquisição com SAP

Depósito nº	**Arame**	**Ref. Va $_{avanço}$**	**Ref. Va $_{recuo}$**	**Im (A)**	**Um (V)**	**F (Hz)**
1	ER5183	900	450	71	11,4	40
2	ER4043	900	450	90	11,5	42
3	ER70S-6	1300	1300	106	11,3	25

Uma estimativa dos valores correspondentes a velocidade de arame regulada foi feita de maneira experimental. Para isso, o programa da fonte foi adaptado de forma a comandar o motor em uma mesma direção, sem a necessidade de abertura do arco. Após um tempo previamente definido e cronometrado, o comprimento de arame deslocado era medido. Com a relação entre tempo e deslocamento de arame, calculou-se a Va alcançada. O ensaio foi realizado com diferentes configurações de parâmetros que, plotados em um gráfico, retornaram uma curva de tendência que relaciona o valor regulado na fonte com a Va em m/min. Utilizando a equação correspondente a essa curva de tendência calcularam-se os valores de Va em m/min para as regulagens citadas na Tabela 20. O resultado pode ser visto na Tabela 21.

Tabela 21 – Estimativa para os valores de Va regulados na fonte durante ensaios com primeiro protótipo apresentados na Tabela 20

Ref. Va regulada na fonte	**Valor estimado (m/min)**
1300	41
900	59
450	118

Apesar de os resultados estimados para a velocidade de arame serem valores com grandeza bastante expressiva, ressalta-se que, durante a soldagem com a alimentação dinâmica, o sistema tracionador está invertendo sua rotação diversas vezes por segundo e, dessa forma, os

tempos de desaceleração e aceleração do motor tem grande influência sobre a velocidade que está efetivamente sendo alcançada.

Uma análise pode ser feita tomando como exemplo o oscilograma apresentado na Figura 107, na soldagem com arame ER5183. Para este caso, verifica-se que o período de transferência foi em média de 25 ms, sendo 15 ms correspondentes ao tempo de arco aberto e 10 ms ao tempo de curto. Assim que é detectado o curto-circuito, o controle da fonte comanda para que o driver inverta a rotação do motor. No entanto, o que acontece é que parte do tempo é consumido com a desaceleração, parada e aceleração no sentido contrário de rotação. Sendo assim, dependendo da resposta de frenagem e aceleração do motor, e também dependendo do tempo necessário para que o curto-circuito seja desfeito, é possível que antes mesmo de o motor atingir a velocidade de regime aconteça a ruptura da ponte metálica e, por consequência, o driver já receba um novo comando de inversão do movimento.

A influência dos tempos relacionados com a inversão do movimento pode ser verificada com o resultado obtido nas filmagens de alta velocidade. A Figura 113 apresenta uma sequência de frames que retratam um evento de transferência para o mesmo exemplo anteriormente citado. Os oscilogramas de tensão e corrente correspondentes estão apresentados na Figura 114. Nos dois ensaios apresentados para alumínio, a velocidade regulada para o movimento de recuo de arame foi o dobro da velocidade de avanço. Essa foi uma opção escolhida na tentativa de diminuir o tempo de curto circuito e aumentar ainda mais a frequência de transferência. Entretanto, analisando a filmagem da movimentação do arame e a transferência de material (Figura 113), verifica-se que, após a ocorrência do curto (frame nº3), mesmo recebendo o comando de inversão do movimento, o arame continua avançando em direção à poça, por um tempo de aproximadamente 3,3 ms. A parada ocorre com a colisão das partes sólidas do arame e da peça, no instante marcado pelo frame 5. Nessa imagem, o mergulho do arame na poça fica evidenciado pela depressão gerada em sua superfície. Com o arame imerso na poça, a troca de calor entre o material fundido da poça e o arame acaba sendo favorecida. Se por um lado, o calor da poça contribui para o aquecimento da extensão sólida de arame, por outro lado, o arame contribui retirando calor da peça. O frame 6 marca o instante imediatamente anterior ao início do movimento de recuo. Entre os frames 5 e 6, o arame permaneceu parado por aproximadamente 2 ms. Com isso, verifica-se que, neste caso, mais de 50% do tempo de curto-circuito foi consumido apenas com a frenagem e parada do arame.

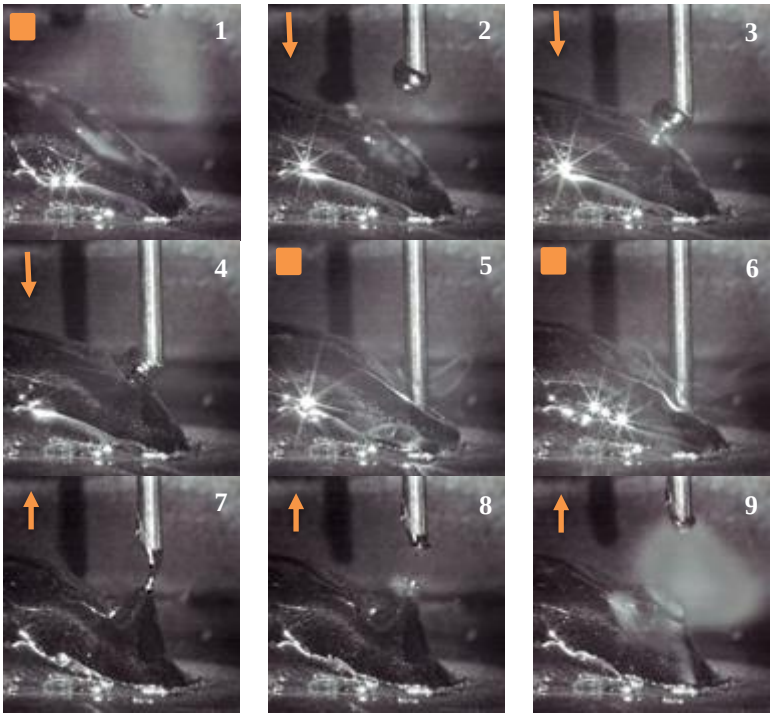


Figura 113 – Sequência da transferência metálica utilizando o protótipo com motor Panasonic na soldagem MIG AD de alumínio ER5183

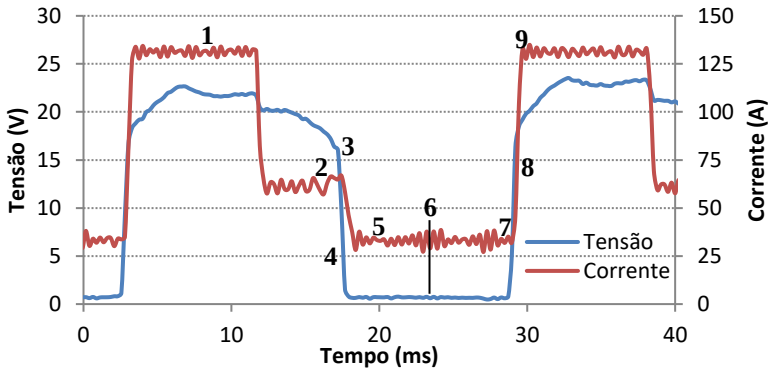


Figura 114 - Oscilogramas de tensão e corrente correspondentes à filmagem da Figura 113

É coerente imaginar que a regulagem das velocidades de avanço e recuo de arame são determinantes para o comportamento da transferência metálica e da frequência alcançada. Assim como também faz sentido afirmar que uma maior velocidade de retorno do arame pode reduzir o tempo de curto-circuito. Apesar disso, a situação apresentada mostra que reduzir o tempo consumido para inversão do movimento também pode representar uma boa alternativa à essa finalidade e, em alguns casos, a ação necessária para reduzir esse tempo é a redução das velocidades de avanço ou recuo configuradas.

Durante a realização de ensaios exploratórios para determinação de valores de velocidade para o avanço e recuo do arame verificou-se que, em determinadas condições onde, por exemplo se desejava reduzir o tempo de curto-circuito, não bastou atuar somente na velocidade de recuo. Neste caso, reduzir também a velocidade de avanço contribuiu com o tempo de inversão do movimento. A Figura 115 mostra um evento de curto-circuito monitorado com a câmera de alta velocidade, com duração de aproximadamente 6,2 ms. Os valores de referência para a velocidade de avanço e recuo do arame foram agora 1000 e 750 respectivamente, ou seja, velocidades menores do que o caso da Figura 114. Nos frames da filmagem mostrados na figura é possível verificar que, pelo fato de o arame estar avançando com uma menor velocidade, o tempo requerido para interromper o movimento é reduzido para aproximadamente 2,5 ms. Percebe-se também que, nessa condição, o arame não mergulha na poça como na situação anterior. A porção sólida do arame permanece a todo momento acima da superfície da poça. Por esse motivo, imediatamente

após o momento do curto-circuito, o material fundido na ponta do arame é atraído pela maior porção de material fundido, sob efeito principal das forças relacionadas com a tensão superficial. Antes mesmo de iniciar o movimento de recuo, a ponte metálica já apresenta uma significativa redução em sua seção transversal (frame 2 - Figura 115), exigindo menos deslocamento de recuo para que aconteça a ruptura do contato e reabertura do arco. Dessa forma, apesar de estar sendo regulado um menor valor de referência para a velocidade de arame, observa-se para essa condição um menor período de transferência (21 ms), que corresponderia à uma frequência de 48 Hz.

A mesma situação foi observada quanto ao estabelecimento do máximo comprimento do arco e do tempo de arco aberto. Se a opção adotada para reduzir o tempo de curto-circuito for o aumento na velocidade de recuo, o tempo consumido para que se interrompa o movimento de retorno após a abertura do arco (desaceleração do arame) será maior. Em outras palavras, o arame recuará uma maior distância resultando em um maior comprimento de arco máximo, o que também pode acarretar em um maior tempo de arco aberto.

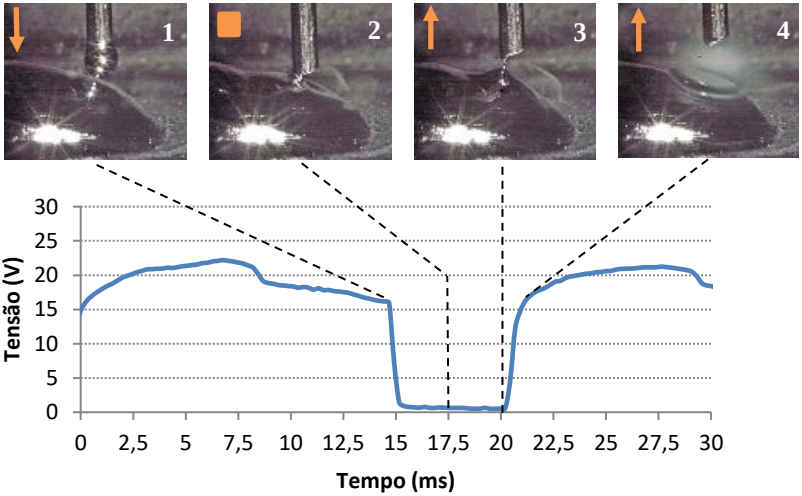


Figura 115 – Detalhe de evento curto-circuito na soldagem de alumínio ER5183 sem mergulho do arame na poça, Ref Va avanço = 1000 e Ref Va recuo = 750

Certamente que a resposta do sistema de acionamento em virtude do recebimento do comando de inversão pode ser uma consequência direta dos parâmetros de controle configurados na parametrização do driver. Isso justificaria as situações observadas quando a resposta obtida ultrapassa o sinal de referência (*overshooting*). Apesar disso, percebe-se que, à medida que se pretende obter uma maior frequência de transferência, aumenta a dificuldade para o acionamento e aumentam também as variações no máximo comprimento do arco. Na Figura 116 é possível verificar em uma sequência de 10 eventos de transferência, o ponto de máximo deslocamento de recuo alcançado pelo arame. Como citado, o resultado pode sim ter relação com os parâmetros de controle do driver, entretanto, outras observações podem ser aqui colocadas. Na Figura 117 foram alinhadas três sequências de imagem (A, B e C) que correspondem ao ponto máximo de avanço (1), o instante de ruptura da ponte metálica (2) e ao ponto de máximo recuo (3). Os frames são relacionados ao mesmo vídeo da Figura 116. A situação A é aquela em que o arame ficou mais distante da superfície da poça; a situação C é aquela em que se obteve o maior avanço do arame, quando a região sólida do arame inclusive atingiu o nível da poça; e a situação B marca uma condição intermediária de avanço. A medida que se tem um maior avanço do arame sobre a poça de material fundido, verifica-se que há também um maior alongamento da ponte metálica para que ocorra o seu rompimento (d1). Prolongar o tempo de ruptura da ponte implica em deixar o acionamento em comando de recuo por mais tempo, ou seja, o motor tem mais tempo para acelerar em busca da velocidade de regime. Em situações onde se alcançam maiores velocidades, deslocamento requerido para frenagem (desaceleração) do motor também aumenta. Dessa forma, constata-se o aumento na distância (d2) correspondente ao recuo do arame após a abertura do arco.

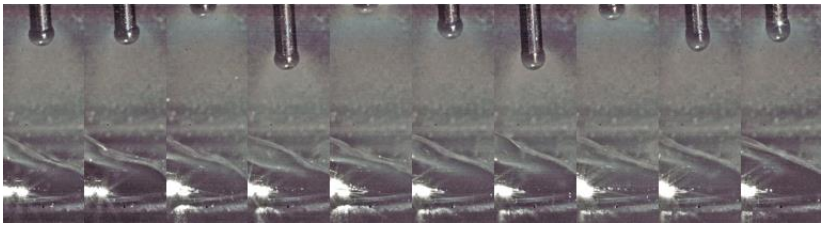
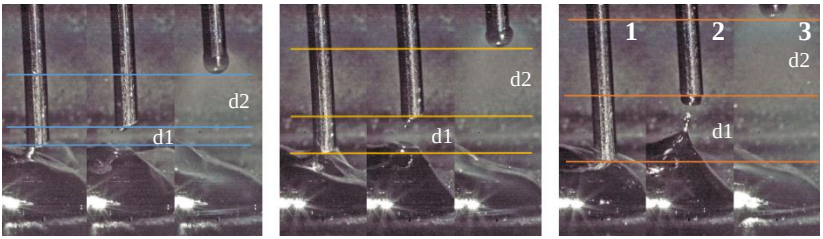


Figura 116 - Variação no máximo comprimento do arco em 10 eventos de transferência, arame ER5183, Ref Va avanço = 1000 e Ref Va recuo = 750



A B C

Figura 117 – Relação entre o mergulho do arame na poça, alongamento da ponte metálica e máximo comprimento do arco

Utilizando o protótipo 1 equipado com o motor Panasonic, as máximas frequências alcançadas em soldagem, com capacidade de produzir um depósito como os que foram mostrados anteriormente ficaram próximas a 40 Hz. Na soldagem com arame de aço carbono, o resultado foi ainda mais limitado, quando foi possível produzir um depósito com boa aparência e continuidade (Figura 111) com apenas 25 Hz de frequência.

Com o propósito de se alcançar maiores níveis de frequência de transferência e, dessa forma ampliar a faixa de aplicação para o sistema MIG/MAG AD em desenvolvimento, a montagem de uma segunda versão do protótipo foi realizada com o novo sistema de acionamento adquirido no período do presente trabalho. Trata-se do sistema da empresa Kollmorgen, apresentado anteriormente no item 4.1.4, com características que se mostraram atrativas para a realização de testes. Os resultados alcançados são apresentados a seguir.

5.4.3.2. Resultados com segundo protótipo

Assim como para o driver utilizado no protótipo 1, a conexão entre o sistema de acionamento do segundo protótipo e o controle da fonte de soldagem foi feita utilizando duas saídas digitais da placa da fonte, programadas para enviar os sinais de *step* e *dir*. Entretanto, os níveis de tensão das saídas da fonte eram limitados em 3,3 V, enquanto que o modelo novo de driver operava em uma faixa entre 3,5 e 24 V. Em uma primeira tentativa de integração, utilizando os valores mais baixos de tensão na entrada do driver, foram identificadas uma série de dificuldades relacionadas com a ocorrência de ruídos elétricos que eram interpretados

equivocadamente pelo driver, o que acabava inviabilizando o controle. Dessa maneira, a alternativa aplicada que resultou em resultados positivos foi a intervenção no circuito da placa da fonte, alterando os níveis de tensão das saídas digitais de 3,3 V para 24 V por meio de um "*pull-up*" externo. Somente com essa implementação foi possível de se iniciar os testes com soldagem utilizando o segundo protótipo.

A mudança do sistema de acionamento provocou ainda uma necessidade de alteração na relação entre a frequência do trem de pulsos (*step*) e a rotação do eixo do motor programada no software. Com isso, os valores (adimensionais) de referência utilizados para a regulagem das velocidades de arame também sofreram alteração. Da mesma forma que para o protótipo anterior, realizou-se um procedimento experimental para determinar a relação entre o parâmetro adimensional regulado e a Va em m/min. Apesar da relativa limitação em se regular os valores de Va por meio de parâmetros adimensionais, a utilização de um maior afastamento entre o protótipo e o cabeçote secundário para o segundo protótipo, possibilitou que fossem realizadas as medições da velocidade de arame consumida com o transdutor da maleta SAP.

Em primeiro momento, a realização de ensaios de soldagem com o novo protótipo teve como um dos principais objetivos a avaliação da capacidade do novo sistema de acionamento adquirido em realizar uma soldagem MIG/MAG AD. Além disso, o esperado era que com essa versão fosse possível de se obter uma maior frequência de transferência do que com a versão anterior.

Em grande parte dos ensaios de soldagem foram agora realizados depósitos com arame de aço carbono ER70S-6, de 1,2 mm de diâmetro. Para tanto foram utilizados três conjuntos de parâmetros de corrente extraídos do sinérgico do CMT, que seriam indicados para Va = 2 m/min, Va = 5 m/min e Va = 7 m/min. A Tabela 22 apresenta os parâmetros regulados. Os valores de Va apresentados em m/min se referem ao resultado obtido em ensaio de deslocamento do arame a vazio (sem soldagem) com movimento contínuo, e representam apenas uma referência para configuração utilizada. Nas regulagens de referência Va5 e Va7 foram ainda realizados ensaios nas condições com e sem pulso de corrente durante o curto-circuito (SP).

Tabela 22 – Parâmetros regulados em ensaios de soldagem com protótipo 2 em aço ER70S-6

Parâmetro	Va2	Va5	Va5-SP	Va7	Va7-SP
Ipa (A)	300	300	300	340	340
Iba (A)	30	50	50	90	90
Ipc (A)	-	180	-	250	-
Ibc (A)	50	80	80	175	175
tpa (ms)	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
tpc (ms)	0	3,1	0	2	0
Vap (m/min)	25 (11 m/min)	50 (19 m/min)	50 (19 m/min)	100 (37 m/min)	100 (37 m/min)
Vab (m/min)	25 (11 m/min)	50 (19 m/min)	50 (19 m/min)	100 (37 m/min)	100 (37 m/min)
Vr (m/min)	30 (12 m/min)	50 (19 m/min)	50 (19 m/min)	100 (37 m/min)	100 (37 m/min)
Ua (V)	9	9	9	9	9
Uc (V)	4	4	4	4	4
Vs (cm/min)	25	30	30	50	50

Os parâmetros apresentados na tabela acima configuram situações em que foi possível de se realizar um depósito contínuo e de bom aspecto superficial. Não foram avaliadas as características geométricas do depósito e tampouco a influência dos parâmetros regulados sobre esse aspecto. A Tabela 23 mostra os resultados obtidos com o sistema de aquisição de dados SAP. Para o ensaio Va2, a corrente média foi medida em 66 A e o depósito foi feito sobre chapa com 1 mm de espessura. Os outros depósitos foram realizados em chapa de 2 mm. Na Figura 118 é possível verificar o resultado obtido com o parâmetro do ensaio Va2, mostrando um cordão bastante regular, sem a incidência de respingos durante a execução da soldagem. Os resultados obtidos nos ensaios com maior intensidade de corrente, correspondentes a Va5 e Va7, são mostrados na Figura 119 e Figura 120 respectivamente.

Tabela 23 – Resultados de aquisição de dados referente à ensaios com aço carbono no protótipo 2

Parâmetro	Va2	Va5	Va5-SP	Va7	Va7-SP
Im (A)	66	111	96	178	160
Ief (A)	102	135	124	198	183
Um (V)	11,9	12,5	13,5	15,8	17,4
Uef (V)	15,6	16,5	17,2	19,1	20,4
Va (m/min)	2,3	2,7	1,9	4,1	4,1
P (W)	1157	1585	1620	2947	2977
F (Hz)	42	38	49	58	61

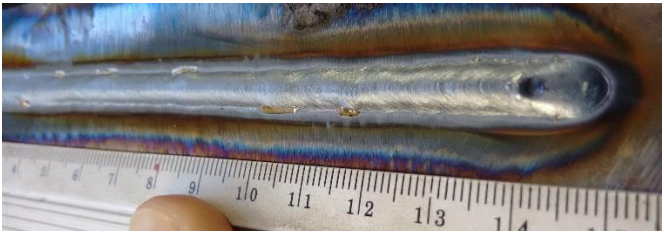


Figura 118 - Depósito de aço carbono em chapa de 1 mm correspondente a ensaio Va2 (Tabela 22)

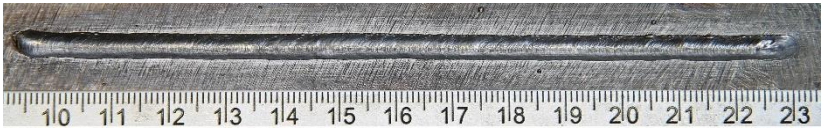


Figura 119 - Depósito de aço carbono em chapa de 2 mm correspondente a ensaio Va5 (Tabela 22)

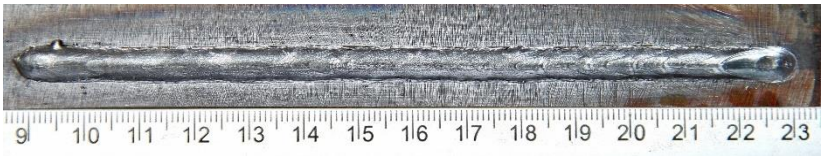


Figura 120 - Depósito de aço carbono em chapa de 2 mm correspondente a ensaio Va7 (Tabela 22)

Os valores de frequência de transferência apresentados na Tabela 23 foram obtidos com base em uma média dos períodos medidos com o sistema de aquisição de dados, durante o intervalo de 1 segundo. Cabe ressaltar que, em alguns dos ensaios, como o caso do Va5-SP (sem pulso de corrente no curto), é notório que existiu uma variação nos períodos de transferência, conforme apresentado no oscilograma da Figura 121. Em média, a frequência de transferência para essa configuração de ensaio foi de 49 Hz. Avaliando o oscilograma do ensaio com pulso de corrente VA5 (Figura 122), foi verificada uma menor variação nos períodos de transferência. Para esse caso, a média da frequência ficou em 38 Hz. Analisando o resultado da filmagem de alta velocidade observa-se que a variação no período é influenciada, principalmente pelo tempo consumido para concluir a transferência da gota à peça e pela posição relativa entre o arame e a peça durante os extremos dos movimentos de avanço e recuo. Quando o arame recua demais, a tendência é que se tenha

um maior tempo de arco. Se o arame mergulha demais na poça, a tendência é que se tenha um aumento no tempo de curto-circuito. A versão do software de controle da fonte até então implementada não prevê estratégias de ação em caso de mudanças no período. De qualquer forma, o sistema atual permite a implementação de algoritmos futuros que certamente poderão operar com essa finalidade.

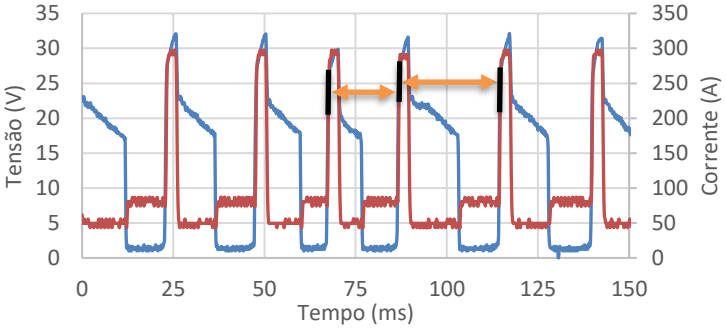


Figura 121 – Oscilogramas de tensão e corrente obtidos em ensaio com aço carbono Va5-SP, com destaque para a variação no período

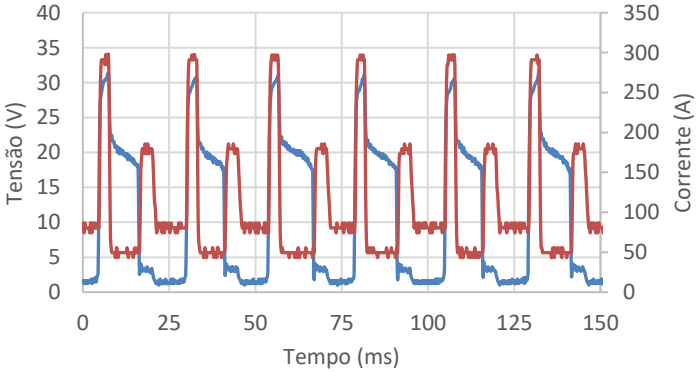


Figura 122 – Oscilogramas de tensão e corrente correspondente ao ensaio Va5

Comparando os dados referentes aos ensaios com e sem pulso de corrente para Va5 na Tabela 23, verifica-se que o ensaio com pulso forneceu uma maior velocidade de arame (2,7 m/min) do que o ensaio sem pulso (1,9 m/min). Apesar de observada essa tendência, as diferenças ainda existentes em termos do período de transferência prejudicam a direta associação dos fatos. Com relação a potência, o valor apresentado pelo ensaio Va5 foi ligeiramente menor e, por esse motivo não é possível

afirmar que de fato a potência foi consideravelmente reduzida nessa situação. A observação colocada fica ao ponto de que, mesmo com potências bastante próximas, foi possível alterar a quantidade de arame fornecida, o que pode representar uma boa flexibilidade na configuração de parâmetros em aplicações distintas. O resultado da filmagem em alta velocidade mostrou uma boa estabilidade em ambos os casos. Em alguns eventos de transferência para a situação sem pulso de corrente, observou-se que a ruptura da ponte metálica ocorreu de forma mais brusca, ocasionando a formação de respingos finos (Figura 123). Para o ensaio Va5 (com pulso de corrente), a condição de ruptura da ponte se mostrou, em geral, mais suave (Figura 124).

Figura 123 – Exemplo de ruptura da ponte metálica em ensaio Va5-SP (sem pulso de corrente no curto)

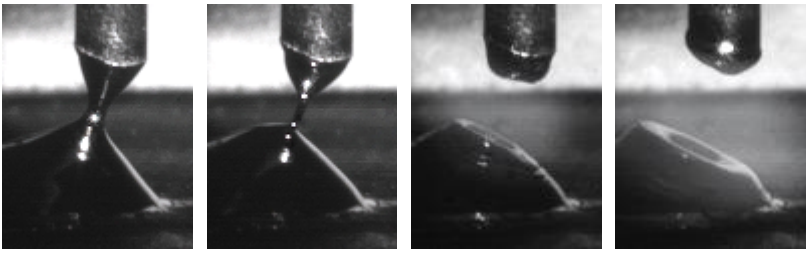


Figura 124 – Exemplo de ruptura da ponte metálica em ensaio Va5 (com pulso de corrente no curto)

Não é possível atribuir uma maior facilidade na ruptura da ponte metálica pelo fato de se ter uma contribuição do efeito pinch provocado pela corrente de pulso. Na filmagem sincronizada com a aquisição de dados, verifica-se que, após o tempo de pulso, a extensão sólida do arame

ainda se encontra em uma altura com relação a poça que não permite o empescoçamento da ponte metálica. É o que mostra a Figura 125. Mesmo assim, é importante ressaltar que o fato de não utilizar o pulso no curto não impossibilitou a realização de um depósito com boas características superficiais.

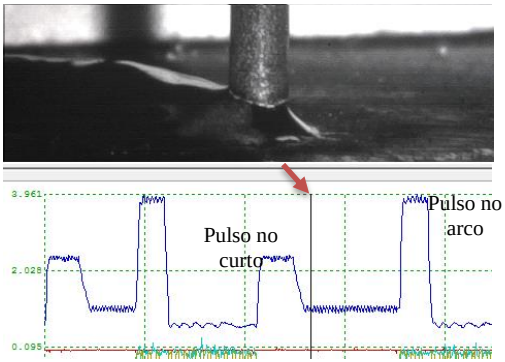
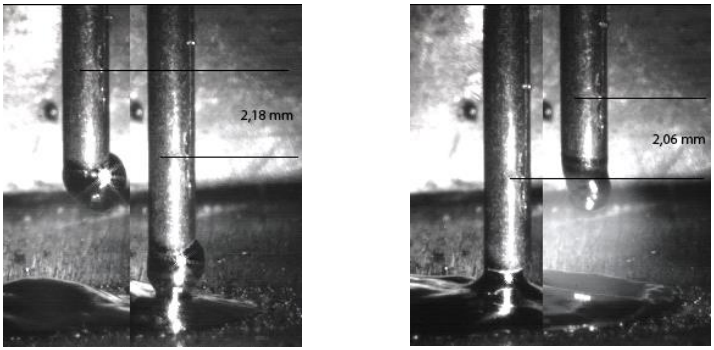


Figura 125 – Contato do arame com a poça após pulso de corrente no curto em imagem extraída do vídeo referente ao ensaio Va53

Como forma de avaliar a velocidade média de avanço e recuo que o arame atingiu nas configurações dos ensaios Va5 e Va7 listados na Tabela 22, foram realizadas medições do deslocamento do arame com base no resultado obtido pela filmagem de alta velocidade. A metodologia utilizada consistiu em extrair do vídeo um frame do início e outro do final do movimento. Tendo como referência marcações ou irregularidades na superfície do próprio arame, o deslocamento foi demarcado utilizando um software de tratamento de imagens. Para referência de dimensão, utilizou-se o diâmetro do arame, que era de 1,2 mm, e a informação do tempo foi extraída do registro da própria câmera. Sabe-se que o método utilizado pode sofrer com diferentes fontes de incertezas na medição, a começar pelo próprio diâmetro do arame, que frequentemente apresenta variações dimensionais significativas. Apesar disto, o objetivo foi produzir uma informação adicional que pudesse ser comparada com o resultado obtido no ensaio de velocidade de arame em vazio citado anteriormente. Para cada valor regulado, foi realizada uma média de três medições obtidas com as imagens da câmera. A Figura 126 exemplifica a medição do deslocamento. No ensaio Va5, onde o parâmetro adimensional de velocidade de avanço e recuo foi regulada em 50, o valor da velocidade média verificada com as imagens foi de 20 m/min para os dois sentidos

de rotação. Para o ensaio Va7, com as velocidades configuradas em 100, o valor médio para o avanço foi de 32 m/min e para o recuo foi de 37 m/min.



Avanço recuo

Figura 126 – Estratégia de medição de deslocamento de arame no avanço e recuo para estimativa das velocidades médias

Para a configuração Va7-SP, a formação de respingos no instante da ruptura da ponte metálica ocorreu mais frequentemente e com uma maior intensidade. É o que mostra a Figura 127. A corrente de base no curto (Ibc), que era de 80 A nos ensaios Va5, passou para 175 A nos ensaios Va7. Só pelo fato de se ter aqui um maior valor de corrente aplicada durante o instante de abertura do arco já se teria uma maior tendência para a formação de respingos. A observação colocada é de que, na situação em que foi aplicado um pulso de corrente no início do curto, essa tendência foi aparentemente reduzida. Com relação a velocidade de arame consumida, não foi possível destacar alguma diferença entre as configurações Va7 (com pulso) e Va7-SP (sem pulso).

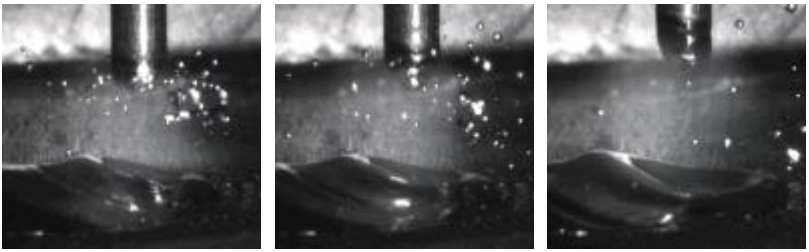


Figura 127 - Exemplo formação de respingos durante a ruptura da ponte metálica em ensaio Va7-SP (sem pulso de corrente no curto)

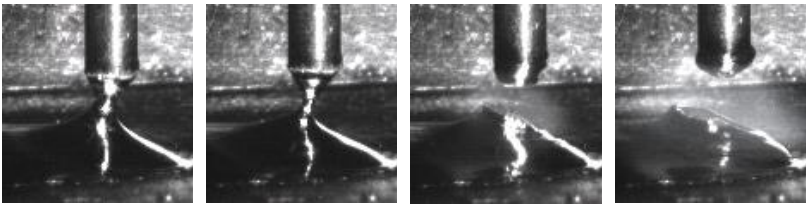
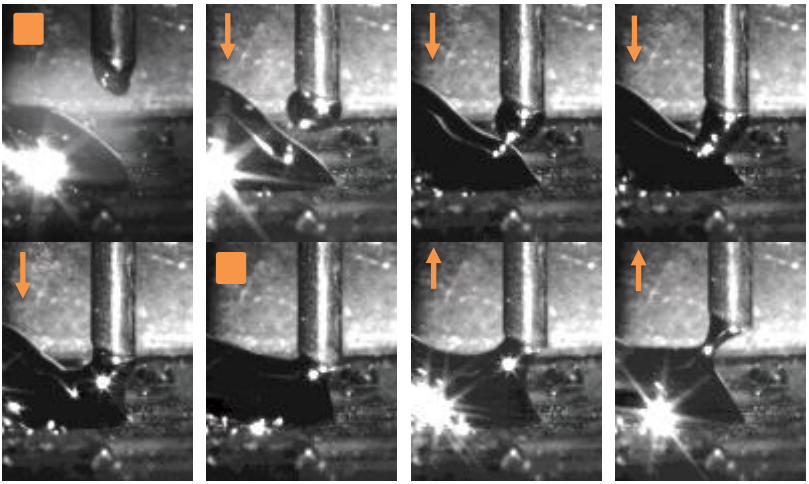


Figura 128 - Exemplo de ruptura da ponte metálica em ensaio Va7 (com pulso de corrente no curto)

O conjunto de parâmetros Va2 foi testado somente na condição sem pulso de corrente. Essa é a configuração que o próprio CMT utiliza para a velocidade de arame de referência 2 m/min. Nesse ensaio, a frequência de transferência alcançada foi, em média, 42 Hz. A estabilidade obtida pode ser verificada na sequência de imagens retiradas da filmagem de alta velocidade mostrada na Figura 129.



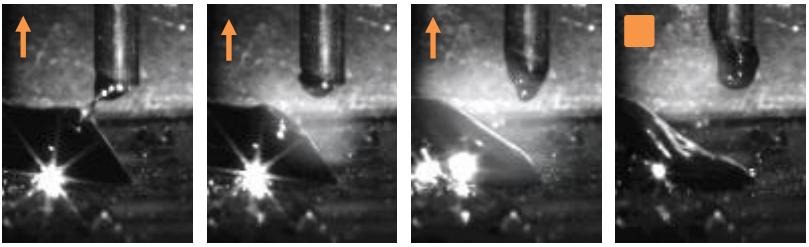
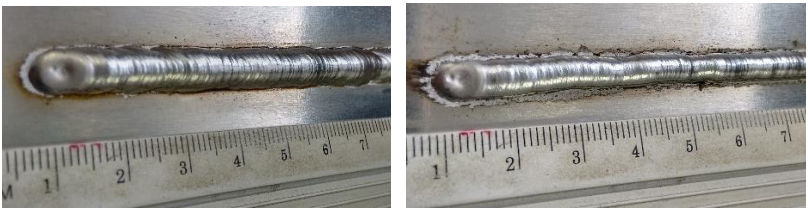


Figura 129 – Sequência de transferência metálica em ensaio Va2, arame de aço carbono ER70S-6

O protótipo 2 foi ainda testado na realização de depósitos utilizando o arame de alumínio ER4043, de 1,2 mm de diâmetro, em chapas de alumínio 1100 com 2 mm de espessura. Os parâmetros utilizados em alguns dos ensaios que forneceram um bom aspecto no cordão depositado estão dispostos na Tabela 24 e o resultado do depósito pode ser visto na Figura 130. A boa estabilidade obtida mostrou inclusive a capacidade de realização da soldagem de uma junta de topo, o que foi feito com chapa de 1 mm de espessura. O resultado está mostrado na Figura 131. Para estes ensaios, um problema de calibração com o sistema de aquisição de dados inviabilizou o monitoramento dos sinais de maneira adequada.

Tabela 24 - Parâmetros regulados em ensaios de soldagem com protótipo 2 em alumínio ER4043

Parâmetro	Depósito alu47	Depósito alu48	Junta alu4
Ipa (A)	150	150	150
Iba (A)	50	50	30
Ipc (A)	-	-	-
Ibc (A)	70	70	70
tpa (ms)	4	4	4
tpc (ms)	0	0	0
Vap	50 (19 m/min)	150 (54 m/min)	15 (7 m/min)
Vab	25 (11 m/min)	75 (28 m/min)	15 (7 m/min)
Vr	30 (12 m/min)	75 (28 m/min)	15 (7 m/min)
Ua (V)	9	9	9
Uc (V)	4	4	4
Vs (cm/min)	30	30	65



Depósito Alu47 Depósito Alu48

Figura 130 – Aspecto superficial de depósitos realizados com arame ER4043 utilizando o protótipo 2

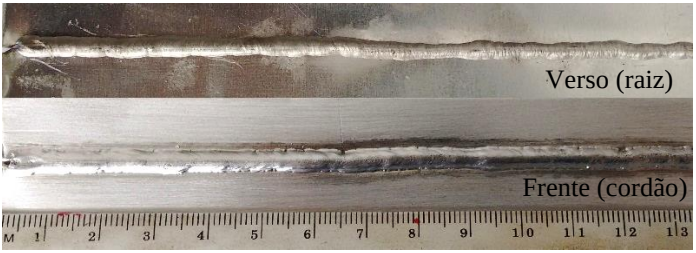


Figura 131 - Soldagem em junta de topo de chapa de 1 mm, arame ER4043 1,2 mm, velocidade de soldagem 65 cm/min

Com os resultados da filmagem em alta velocidade para o alumínio foram calculados os valores médios de frequência de transferência nos ensaios Alu47 e Alu48, que corresponderam a 34 e 52 Hz respectivamente. Analisando os vídeos realizados nas soldagens com alumínio percebe-se que o movimento de avanço e recuo do arame, em alguns momentos, aconteceu de forma intermitente, assim como se o arame estivesse sofrido uma restrição a sua passagem por algum lugar na tocha. Uma hipótese levantada é de que, por ser um arame bastante maleável, os roletes tracionadores poderiam estar o deformando, o que provocaria uma maior resistência na sua passagem pelo bico de contato. A intermitência no movimento do arame provocou alterações nos períodos de transferência, justificando assim toda a preocupação com a suavidade do movimento. Isso inclui a observação de pontos como a pressão dos roletes tracionadores do arame e o seu estado de conservação,

assim como o desgaste que se encontram o bico de contato e o conduíte instalado internamente no pescoço da tocha. Outra observação colocada com relação a mecânica do movimento do arame está relacionada com a possibilidade de folgas, seja do arame no interior do conduíte, seja do conduíte no interior do pescoço. A existência de folgas demasiadas pode provocar uma defasagem no movimento efetivo do arame na ponta da tocha com relação ao movimento de rotação no motor, o que por sua vez acabaria ocasionando variações no período de transferência.

Por fim, após uma reavaliação dos parâmetros de controle do driver do motor do tracionador, foram alcançados resultados ainda melhorados em termos de resposta de inversão do sentido de rotação do motor. Com isso, a capacidade de se aumentar o valor da frequência de transferência foi aumentada. O oscilograma da Figura 132 é correspondente a um ensaio com aço carbono, utilizando os mesmos valores de corrente configurados para o ensaio Va5-SP da Tabela 22. Nele constata-se uma sequência de 18 pulsos de corrente em um intervalo de 200 ms, o que corresponde a uma frequência de transferência de 90 Hz. Até a finalização deste trabalho, esta foi a maior frequência de transferência alcançada com o sistema de soldagem MIG/MAG AD desenvolvido.

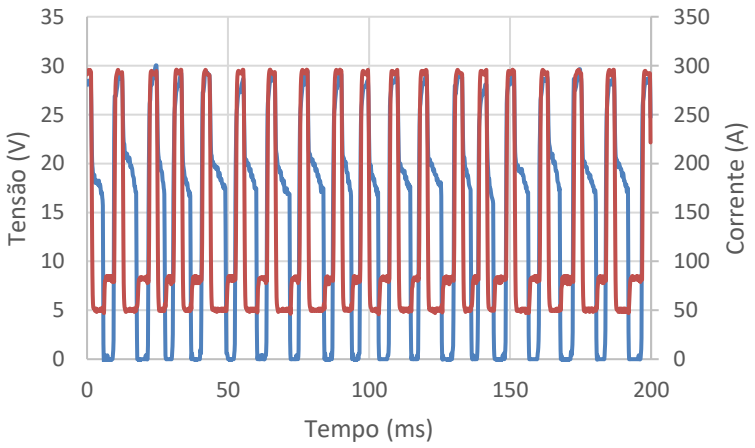


Figura 132 – Oscilogramas de tensão e corrente em ensaio com aço carbono, com média de frequência de transferência próxima a 90 Hz

6. CONCLUSÕES

A pesquisa, desenvolvimento e inovação empreendidos neste trabalho conseguiram atingir os objetivos almejados estabelecidos inicialmente. O trabalho constituiu um elo de conexão com os resultados obtidos pelo autor em seu trabalho de mestrado, obtendo aqui um salto de qualidade, profundidade, quantidade de informações e, sobretudo, inovação. À época do mestrado foram levantados os princípios gerais que regiam o processo MIG/MAG CMT e foram determinadas as condições em que o mesmo oferecia um diferencial para a soldagem de raiz de chapas espessas de ligas de alumínio. Os resultados obtidos atingiram a prática na construção do veleiro ECOUFSC 60. Entretanto, conforme descrito nos objetivos do atual trabalho, uma real contribuição para o desenvolvimento nacional, segundo entendimento da instituição LABSOLDA, somente seria possível quando esta instituição criasse os fundamentos para a construção de um equipamento próprio, seguindo o seu curso na história. Estes fundamentos foram estabelecidos e descritos no presente trabalho, embora uma sequência evolutiva já esteja em curso. O fato é que já se encontra disponível um sistema versátil e aberto a qualquer tipo de experiências que for planejado, havendo uma independência das limitações impostas por um sistema comercial como o CMT.

Das investigações que vem sendo realizadas desde o trabalho de dissertação dentro da tecnologia CMT e de outros trabalhos correlatos em versões avançadas do MIG/MAG, deduz-se que a fundamental influência de cada versão sobre as características da solda está no diferencial que cada uma oferece na relação potência versus velocidade do arame. Não é sem motivo que nos primórdios da utilização do processo MIG/MAG, muitas vezes ele era criticado e evitado sob a alegação de obtenção de soldas “frias” (muito reforço e pouca penetração) e frágeis. Ao longo do tempo, com a adequação dos gases de proteção, das fontes de soldagem e das novas versões do processo, tem sido possível a obtenção de soluções compatíveis para cada aplicação. Além, é claro, da citada relação da potência versus velocidade de arame, há todo um conjunto de mecanismos de influência dinâmica e que não podem ser tratados invocando os seus valores macros ou médios. A versão CMT, embora numa análise semântica de significado o outorgador da nomenclatura não tenha cometido qualquer infração que o possa ser condenado, o que o consumidor absorveu do significado da nomenclatura foi bem diferente. O batismo de *Cold Metal Transfer*, que na tradução literal significa

transferência metálica fria, pode ter o devido significado justificado pelo momento da transferência propriamente dita, ocorrida em baixos níveis de potência, já que a tensão está em valores próximos a zero. Além disso, no momento da ruptura da ponte metálica, os valores impostos para a corrente são totalmente controláveis, diferentemente da versão convencional do processo, onde este momento é caracterizado como sendo o instante de maior corrente e tensão, resultando em picos de potência. Para o caso do CMT, a transferência por curto-circuito não depende diretamente das forças eletromagnéticas geradas pela passagem da corrente, sendo viabilizada principalmente pela tensão superficial associada ao movimento de recuo do arame. Entretanto, o que se observa é que em situações como na soldagem de alumínio, a potência média obtida com esta versão é mais alta do que com o modo convencional. Sob esta ótica, se explica o sucesso do CMT logo no seu lançamento, pois era a versão do processo que oferecia uma faixa intermediária de potência entre o convencional, com muito baixa potência, e o pulsado, com uma potência que extrapolava o que era o ideal para aplicações como a soldagem de chapas finas de alumínio.

Com relação a resposta do equipamento CMT quanto às regulagens dos parâmetros adimensionais de correção, os resultados apresentados no trabalho evidenciaram a atuação da fonte nas diferentes configurações avaliadas. Os ensaios realizados para esse fim contribuíram com a caracterização da variante do processo e compreensão de estratégias de controle aplicadas pela fonte.

As características observadas para o CMT são resultado de avaliações feitas em apenas alguns dos programas sinérgicos disponíveis no equipamento. As particularidades de cada programa avaliado podem ter funções ou comportamentos distintos entre eles, como a discussão tratada sobre a inserção ou não do pulso de corrente durante o curto-circuito em programas de aço carbono e alumínio. Sobre isto, foi verificado que, na soldagem com aço carbono, a adoção do pulso de corrente pode contribuir com o aumento na taxa de fusão do arame, devido ao incremento da parcela de aquecimento provinda por efeito joule. Ainda para o aço de carbono, apesar da inserção do pulso de corrente durante o curto poder contribuir com a estricção da ponte metálica, vale ressaltar que esse efeito não é consequência exclusiva das forças eletromagnéticas. Outras forças atuantes, como o caso da própria tensão superficial, colaboram com o empescoçamento da ponte metálica, mesmo antes que o movimento de recuo inicie. Na soldagem de alumínio, a inserção do pulso de corrente no curto-circuito provoca instabilidades demasiadas e a ruptura prematura da ponte metálica.

Com relação ao desenvolvimento do sistema de soldagem MIG/MAG AD é possível concluir que o protótipo teve seu funcionamento validado com a realização de depósitos com boa aparência e continuidade. Os dois conjuntos de servo acionamentos testados nos ensaios de soldagem permitiram a realização de depósitos em aço e alumínio com bom aspecto superficial e estabilidade no arco. Apesar disso, os maiores valores em termos de frequência de transferência foram obtidos com o acionamento do fabricante Kollmorgen. Nesse aspecto, verifica-se que o protótipo desenvolvido neste trabalho possibilitou a realização de depósitos com frequências de movimentação do arame compatíveis com os valores monitorados no CMT, chegando em valores de até 90 Hz em ensaios com o arame de aço carbono.

As estratégias de controle definidas para as diferentes etapas do processo (abertura, soldagem e finalização) corresponderam de maneira adequada, oferecendo condições para a realização dos ensaios de soldagem. Diferentemente da fonte CMT, o equipamento permite a configuração independente dos parâmetros envolvidos no processo, como velocidades de avanço, velocidade de recuo ou tempos de atraso, que podem ser alterados de acordo com a necessidade e a metodologia de pesquisa que está sendo traçada. Por outro lado, a inexistência de programas sinérgicos para o sistema MIG MAG AD desenvolvido dificulta a seleção dos parâmetros para a produção de um depósito com adequada condição de estabilidade. Sobre esse aspecto, cita-se o recurso da filmagem em alta velocidade como sendo uma ferramenta essencial para a avaliação e análise dos eventos de transferência.

Por fim, pode-se ainda afirmar que o estágio de desenvolvimento do protótipo alcançado ao final do trabalho oferece condições para a continuidade na pesquisa e desenvolvimento, seja em termos de processos de soldagem com alimentação dinâmica, seja em novas proposições de estratégias de controle. Dessa forma, a implementação do referido sistema de soldagem MIG/MAG AD constitui a criação de uma importante ferramenta para os trabalhos de pesquisa e desenvolvimento em assuntos correlatos ao tema.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O resultado alcançado com o desenvolvimento de um sistema capaz de realizar a soldagem MIG/MAG com alimentação dinâmica de arame abre espaço para a realização e continuidade de trabalhos relacionados com o tema, seja com relação ao estudo da física do processo, seja em melhorias do equipamento. Sendo assim, abaixo estão apresentadas algumas sugestões para trabalhos futuros:

- Visando a ampliação da faixa de atuação da versão MIG/MAG AD, uma sugestão colocada é o desenvolvimento de novas composições de formas de onda de corrente, como a inclusão da alternância de polaridade, ou a mistura de versões como o pulsado ou o CCC. O desenvolvimento de estratégias de controle que permitam a utilização de diferentes filosofias contribui para a pesquisa com diferentes relações entre velocidade de arame e potência, além de permitir a implementação de parâmetros dedicados para os mais diferentes materiais de adição. Versões que utilizam a polaridade negativa, assim como o CMT Advanced, tem atualmente apresentado bons resultados em aplicações como manufatura aditiva, representando um vasto campo exploratório.
- A flexibilidade alcançada com o sistema desenvolvido permite a configuração de parâmetros antes não possíveis de serem regulados. Sendo assim, em confluência com observações indicadas no decorrer do presente trabalho, outra sugestão apresentada está no estudo sobre a influência do mergulho do arame na poça metálica como estratégia para redução do aporte de calor a peça. Em aplicações como, por exemplo a soldagem dissimilar de aço galvanizado com alumínio, a quantidade de calor imposto à peça é dada como justificativa para o surgimento de uma camada intermetálica frágil. Quando o arame é mergulhado ciclicamente na poça, parte do calor do material fundido acaba sendo conduzido para o arame, o que contribui para o seu pré-aquecimento e para o resfriamento da poça. A pesquisa seria desenvolvida nesse contexto, avaliando as implicações do mergulho do arame no resultado da solda, o que poderia inclusive ser estendido para outras aplicações, como a própria manufatura aditiva.

- A consolidação de um equipamento com características operacionais que permitam a realização de ensaios em condições similares à aplicação industrial implica em melhorias no sistema apresentado neste trabalho. Dentre as necessidades, cita-se a pesquisa e desenvolvimento de soluções para a integração definitiva do cabeçote de alimentação secundária ao sistema de alimentação dinâmica de arame. A proposta inicial poderia partir da avaliação do uso de uma metodologia de controle baseada em um sensor que monitora a quantidade de arame em um dispositivo de armazenamento intermediário, semelhante ao que é visto no buffer do CMT. Por outro lado, a pesquisa poderia buscar outras soluções, como a utilização de um sinal de referência de velocidade de arame média fornecido pelo driver responsável pela alimentação dinâmica, com o intuito de realimentar o controle do motor secundário, que atuaria como um escravo do primeiro. Dessa forma, se eliminaria a necessidade de um dispositivo intermediário, simplificando a estrutura do equipamento e as operações de manutenção e troca de arame.

8. REFERÊNCIAS

[1] AMIN, M. Pulse current Parameters for arc stability and controlled metal transer in arc welding. **Metal Construction**, 15 (5), May 1983. 272-278.

[2] AMIN, M. Synergic pulse MIG welding. **Metal Construction**, 13 (6), June 1981. 349-353.

[3] ESSERS, W. G.; GOMPEL, M. R. M. V. Arc Control with Pulsed GMAW Welding. **Welding Journal**, USA, June 1984. 26-32.

[4] SCHNICK, M. et al. **Cathode focussed TIG – Fundamentals and Applications**. [S.l.]. Congresso IIW XII.

[5] DUTRA, J. C. et al. Automating a Wheel Manufacturing Operation. **Welding Journal**, v.93, 2014. p. 76-84.

[6] DUTRA, J. C. et al. Improving Surfacing Performance with GMAW. **Welding Journal**, v.92, 2013. p. 42-47.

[7] MARQUES, C. **Prospecções da Natureza Física da Soldagem MIG Automática de Ligas de Alumínio**. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, p. 101 f. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia).

[8] SAVI, B. M. **Desenvolvimento Tecnológico para Soldagem MIG de Ligas de Alumínio 5083 H116**. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, p. 101 f. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia).

[9] DUTRA, J. C.; SILVA, R. H. G.; MARQUES, C. Características de fusão e potência de soldagem com a transferência MIG - CMT versus MIG convencional para Alumínio 5183. **Soldag.insp.**, São Paulo, v.18, n. 1, mar 2013. http://dx.doi.org/10.1590/S0104-92242013000100003.

[10] SILVA, R. H. G. **Soldagem MIG/MAG em transferência metálica por curto-circuito controlado aplicada ao passe de raiz**. Universidade Federal de Santa Catarina, p. 127. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia).

[11] TIP TIG INTERNATIONAL AG. **TIP TIG - It's an Evolution of the TIG Welding**. [S.l.]. catálogo do fabricante, acesso em 30/08/2014, disponível em: http://tiptig-international.com/TTI%20Brochure.pdf.

[12] JETLINE ENGINEERING. **Operation manual for CWF-23-E-9900 Dabber-Type Wire Feeder**. Irvine, CA. 2013.

[13] RUDY, J. F. Development and Application of Dabber Gas Tungsten Arc Weldin for Repair of Aircraft Engine, Seal Teeth. **The American Society of Mechanical Engineers**, New York, 1982. 4p.

[14] EWM GROUP. **tigSpeed drive - TIG Quality Welding at MIG/MAG Speed**. [S.l.]. catálogo de fabricante.

[15] LABSOLDA - INSTITUTO DE SOLDAGEM E MECATRÔNICA. Notícias, 2007. Disponivel em: <http://www.labsolda.ufsc.br/noticias/2007/carta_patente.gif>. Acesso em: 29 setembro 2014.

[16] GOHR JR., R. **Novos Métodos de Controle da Soldagem MIG/MAG**. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, p. 165. 2002. Tese (Doutorado em Engenharia).

[17] SCOTTI, A.; PONOMAREV, V. **Soldagem MIG/MAG:** melhor entendimento, melhor desempenho. 1ª. ed. São Paulo: Artliber Editora, 2008.

[18] BAIXO, C. E. I. **Estudo da Soldagem MIG/MAG pela técnica hiperbárica a seco visando sua aplicação em procedimentos de reparo submarino**. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, p. 191. 1999. Tese (Doutorado em Engenharia).

[19] WASZINK, J. H.; GRAAT, L. H. J. Experimental Investigation of the Forces Action on a Drop of Weld Metal. **Welding Journal**, April 1983. 108s - 116s.

[20] LIBMAN, E. E. **The Surface Tension Of Molten Metals with a Determination of the Capillary Constant of Copper**. University of Illinois. Urbana, p. 52. 1928. Bulletin Nº 173.

[21] MATSUNAWA, A.; OHJI, T. Role of Surface Tension Transfer in Fusion Weldin (Part 1). **Transactions of JWRI**, Osaka, Vol. 11, 1982. 145-154.

[22] XIAO, Y. H.; OUDEN, G. D. Measurement of surface tension of liquid metals and alloys under arc welding conditions. **Materials Science and Technology**, Vol.13, september 1997. 791-794.

[23] UNESP - GRUPO DE PLASMAS E MATERIAIS. Caracterização de materiais - Ângulo de contato e energia de superfície. Disponivel em: <http://www2.sorocaba.unesp.br/gpm/angulo%20cont%20energia%20superf.htm>. Acesso em: 21 janeiro 2017.

[24] DALTIN, D. **Tensoativos; química, propriedades e aplicações**. 5ª. ed. São Paulo: Blucher, 2011. 7-9 p.

[25] RAYLEIGH, L. On the capillary Phenomena of Jets. **Proceedings of the Royal Society of London**, London, January 1879. 71-97.

[26] SUBRAMANIAM, S. et al. In situ optical measurement of liquid drop surface tension in gas metal arc welding. **Journal of Physics D: Applied Physics**, Vol.31, n. n. 16, 6 May 1998. 1963-1967.

[27] KEENE, B. J. Review of data for the surface tension os pure metals. **International Materials Reviews**, Vol.38, 1993. 157-192.

[28] BAINBRIDGE, I. F.; TAYLOR, J. A. The Surface Tension of Pure Aluminum and Aluminum Alloys. **Mettalurgical and Materials Transactions**, 44A, August 2013. 3901-3909.

[29] DUTRA, J. C. **Procedimento Computadorizado de Determinação, Seleção e controle de variáveis na soldagem MIG/MAG**. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, p. 179. 1989. Tese (Doutorado em Engenharia).

[30] LESNEWICH, A. Control of Melting Rate and metal Transfer in Gas-Shielded Metal-Arc Welding - Parts I & II. **Welding Journal**, August / September 1958. 343s-353s & 418s-425s.

[31] PINTO, H. et al. A Comparative Study of Microstructure and Residual Stresses of CMT-, MIG- and Laser-Hybrid Welds. **Materials Science Forum**, 524-525, setembro 2006. 627-632.

[32] GMBH, F. I. Cold Metal Transfer - The Technology. Disponivel em: <http://www.fronius.com/cps/rde/xbcr/SID-B154D75F-D7DC98BB/fronius_international/M_06_0001_EN_CMT_leaflet_44211_snapshot.pdf>. Acesso em: 03 setembro 2016.

[33] KAH, P.; SUORANTA, R.; MARTIKAINEN, J. Advanced gas metal arc welding processes. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, London, 30 setembro 2012. 655-674. DOI 10.1007/s00170-012-4513-5.

[34] FRONIUS INTERNATIONAL GMBH. **CMT Process - Practises "Energy Saving" - Green Thinking**. [S.l.]. Slides de apresentação.

[35] JETLINE ENGINEERING. **Operation Manual for CSC MIG Weld Process Controller**. Jetline Engineering. Irvine, CA, USA, p. 50p. 2004.

[36] KAPUSTKA, N. et al. **Parameter Characterization of Mechanically-Controlled Pulsed-Short Circuit Gmaw**. ISOPE. Columbus, Ohio, USA: [s.n.]. 2004. p. 3.

[37] PANASONIC ROBOT AND WELDING SYSTEMS EUROPE. Tawers Welding System (Catálogo Online). **Site da Panasonic Robotics**. Disponivel em: <https://eu.industrial.panasonic.com/sites/default/pidseu/files/downloads/files/panasonic_tawers.pdf>. Acesso em: 24 Janeiro 2017.

[38] SKS WELDING SYSTEMS. Torch Systems- Single Wire Frontpull 8 - microMIG. Disponivel em: <https://www.sks-welding.com/en/torch-systems/single-wire/frontpull-8/micromig-micromig-cc.html>. Acesso em: 24 Janeiro 2017.

[39] HIROTA, Y. et al. Newly Developed Controls for Arc Welding Robot. **International Journal of Automation Technology**, Osaka, Japan, Vol.7, 5 January 2013. 95-102.

[40] AREVALO, H. D. H.; VILARINHO, L. O. Desenvolvimento e Avaliação de Calorímetros por Nitrogênio Líquido e Fluxo Contínuo para Medição de Aporte Térmico. **Soldagem & Inspeção**, São Paulo, 17, n. nº3, Jul/Set 2012. 236-250.

[41] PEPE, N. et al. Measuring the Process Efficiency of Controlled Gas metal Arc Welding Processes. **Science and Technology of Welding and Joining**, 16, n. 5, 2011. 412-417.

[42] KOU, S. **Welding Metallurgy**. 2ª. ed. [S.l.]: Wiley Interscience, 2002. 461p p. ISBN ISBN 0-471-43491-4.

[43] DUTRA, J. C.; SILVA, R. H. G.; MARQUES, C. Melting and welding power characteristics of MIG–CMT versus conventional MIG for aluminium 5183. **Welding Internacional**, 2015, v. 29, n. 3, p. 181-186.

[44] SILVA, R. H. G. **Aporte Térmico, penetração e Rendimento de deposição na Soldagem MIG/MAG em Curto-ircuito Controlado**. Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás - IBP. Salvador, p. 6p. 2005. Anais do 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás.

[45] PICKIN, C. G.; YOUNG, K. Evaluation of cold metal transfer (CMT) process for welding aluminium alloy. **Science and Technology of Welding and Joining**, Vol. 11, n. 5, 2006.

[46] KANG, M.; KIM, C. Joining Al 5052 alloy to aluminized steel sheet using cold metal transfer process. **Materials and Design**, 81, 18 May 2015. 95-103.

[47] ZHANG, H. T. et al. Interfacial microstructure and mechanical properties of aluminium–zinc-coated steel joints made by a modified metal inert gas welding–brazing process. **Materials Characterization**, 58, n. 7, July 2007. 588-592.

[48] BRUCKNER, J. Cold Metal Transfer Has a Future Joining Steel to Aluminum. **Welding Journal**, Vol.84, n. 6, Junho 2005. 38-40.

[49] ZHANG, H. T.; FENG, J. C.; HE, P. Interfacial phenomena of cold metal transfer (CMT) welding of zinc coated steel and wrought

aluminium. **Materials Science and Technology**, novembro 2008. 1346-1349.

[50] ZHANG, H. T. et al. The arc characteristics and metal transfer behaviour of cold metal transfer and its use in joining aluminium to zinc-coated steel. **Materials Science and Engineering**, 499, Janeiro 2009. 111-113.

[51] ÜNEL, E.; TABAN, E. Properties and optimization of dissimilar aluminum steel CMT welds. **Welding in the World**, 17 October 2016. 1-9.

[52] PARK, H. J. et al. Joining of Steel to Aluminum Alloy by AC Pulse MIG Welding. **Materials Transactions**, 50, n. No. 9, 25 August 2009. 2314-2317.

[53] SHAO, L. et al. Effect of joining parameters on microstructure of dissimilar metal joints between aluminum and galvanized steel. **Materials and Design**, 66, 20 June 2014. 453-458.

[54] FENG, J.; ZHANG, H.; HE, P. The CMT short-circuiting metal transfer process and its use in thin aluminium sheets welding. **Materials and Design**, 30, 2009. 1850-1852.

[55] TONG, H. et al. Quality and productivity improvement in aluminium alloy thin sheet welding using alternating current pulsed metal inert gas welding system. **Science and Technology of Welding and Joining**, 6, n. No.4, 2001. 203-208.

[56] ARIF, N.; CHUNG, H. Alternating current-gas metal arc welding for application to thin sheets. **Journal of materials Processing Technology**, 214, 8 April 2014. 1828-1837.

[57] EGERLAND, S. A. Status and Perspectives in Overlaying under Particular Consideration of Sophisticated Welding Processes. **Quarterly Journal of the Japan Welding Society**, 27, n. n°2, 2009. 50-54.

[58] PICKIN, C. G.; WILLIAMS, S. W.; LUNT, M. Characterisation of the cold metal transfer (CMT) process and its application for low dilution cladding. **Journal of Materials Processing Technology**, Vol.211, Março 2011. 496-502.

[59] DUTRA, J. C. et al. A new approach for MIG/MAG cladding with Inconel 625. **Welding in the World**, 60, 26 July 2016. 1201-1209.

[60] FOKENS, R. **Cold Metal Transfer - CMT - A Revolution in Mechanized Root Pass Pipeline Welding**. 4th Pipeline Technology Conference. Hannover, Germany. 2009.

[61] KIM, C. Back Bead Characteristics during Butt Welding of a Thick Plate for Various Backing Conditions. **Materials Science Forum**, 654-656, Junho 2010. 350-353.

[62] SARTORI, F. **Tecnologias e Técnicas Modernas do Processo MIG/MAG para o Passe de Raiz em Soldagem Orbital de Tuboss**. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, p. 115p. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia).

[63] ALBERTI, E. A.; SILVA, L. J. D.; D'OLIVEIRA, A. S. C. M. Manufatura Aditiva: o papel da soldagem nesta janela de oportunidade. **Soldagem & Inspeção**, São Paulo, 19, n. n.2, Junho 2014. 190-198.

[64] CONG, B.; DING, J.; WILLIAMS, S. Effect of arc mode in cold metal transfer process on porosity of additively manufactured Al-6.3%Cu alloy. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 76, February 2015. 1593-1606.

[65] ALMEIDA, P. M. S.; WILLIAMS, S. Innovative process model of Ti–6Al–4V additive layer manufacturing using cold metal transfer (CMT). **Proccedings of the 21st Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium**, Austin, January 2010.

[66] BRUCKNER, J. et al. **Current Welding Practice:** CMT Technology. 1ª. ed. Düsseldorf: DVS Media Gmbh, v. Vol.11, 2013.

[67] FRONIUS INTERNATIONAL GMBH. **Manual de instrução de operação - Controle Remoto RCU5000i**. [S.l.], p. 241. 2010.

[68] GÜNTHER, F.; MANFRED, S.; KARIN, H. **Antriebsmotor zur Schweißdrahtförderung**. EP 2 740 558 A1, 02 fev. 2005. Disponivel em: <https://patentimages.storage.googleapis.com/pdfs/1c3c3a6a9cf55

d034cad/DOCUMENT.PDF>. Patente FRONIUS International Gmbh.

[69] KAZMAIER, J. **CMT Advanced Technology - An Arc Process Revolution**. FRONIUS International GMBH. Wels-Thalheim, Austria. 2010.

[70] PANG, J. et al. Arc characteristics and metal transfer behavior of CMT + P welding process. **Journal of Materials Processing Technology**, 18 July 2016. 212-217.

[71] SUN, Z. et al. Investigation of droplet transfer behaviours in cold metal transfer (CMT) process on welding Ti-6Al-4V alloy. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 80, October 2015. 2007-2014.

[72] IMC Soldagem. **SAP-4 - Sistema de Aquisição Portátil**. Disponivel em: <http://www.imc-soldagem.com.br/sap_4.html>. Acesso em: 03 jan. 2012.

[73] LABSOLDA. TC1 - Instrumento para medição de tensão e corrente. Disponivel em: <http://www.labsolda.ufsc.br/projetos/projetos_viabilizados/tc_1.php>. Acesso em: 08 novembro 2016.

[74] DUTRA, J. C. MIG/MAG - Transferência Metálica por Curto-Circuito - Fontes de Soldagem versus Gases do Arco. **Soldagem e Inspeção**, São Paulo, v. 13, n. 1, p. 019-024, Jan/Mar 2008.