



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

ALEX SANDRO PEREIRA

**Influência e Flexibilidade do Controle Eletromecânico da Transferência Metálica do
Processo GMAW-AD**

Florianópolis

2024

Alex Sandro Pereira

**Influência e Flexibilidade do Controle Eletromecânico da Transferência Metálica do
Processo GMAW-AD**

Tese de doutorado submetido(a) ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina

Orientador: Prof. Dr. Régis Henrique Gonçalves e Silva
Coorientador: Dr. Cleber Marques

Florianópolis

2024

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

Pereira, Alex Sandro

Influência e Flexibilidade do Controle Eletromecânico da Transferência Metálica do Processo GMAW-AD / Alex Sandro Pereira ; orientador, Prof. Dr. Régis Henrique Gonçalves e Silva , coorientador, Dr. Cleber Marques, 2024.

185 p.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Florianópolis, 2024.

Inclui referências.

1. Engenharia Mecânica. 2. Transferência metálica. 3. Controle Eletromecânico . 4. GMAW-AD. I. e Silva , Prof. Dr. Régis Henrique Gonçalves . II. Marques, Dr. Cleber . III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título.

Alex Sandro Pereira

**Influência e Flexibilidade do Controle Eletromecânico da Transferência Metálica do
Processo GMAW-AD**

O presente trabalho em nível de doutorado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta
pelos seguintes membros:

Prof. Milton Pereira, Dr. Eng.

Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC

Prof. Arnaldo Ruben Gonzalez, Dr. Eng.

Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS

Prof. Marcelo Ferreira Motta, Dr. Eng.

Universidade Federal do Ceará – UFC

Prof. Nelso Gauze Bonacorso, Dr. Eng.

Instituto Federal de Santa Catarina - IFSC

Certificamos que está é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado
para obtenção do título de doutor em Engenharia Mecânica.

Prof. Henrique Simas, Dr. Eng.

Coordenador do Programa de Pós-Graduação

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

Orientador

Dr. Cleber Marques

Coorientador

Florianópolis, 2024

Dedico este trabalho à minha família, em especial a minha esposa
Gisele, aos meus pais Roberto e Jovita e ao meu irmão Lucas.

Agradecimento

Em primeiro lugar, gostaria de expressar minha sincera gratidão à minha esposa, Gisele Sachet Ghisi, por seu amor, paciência e apoio incondicional ao longo desta jornada. Sua compreensão e encorajamento foram fundamentais para que eu pudesse concluir este trabalho.

Agradeço profundamente aos meus pais, Roberto Carlos Pereira e Jovita Fedrizzi Pereira, por acreditarem em mim e me apoiarem em todos os momentos. Sua dedicação e sacrifícios foram essenciais para que eu pudesse chegar até aqui.

Ao meu irmão, Lucas Eduardo Pereira, agradeço o incentivo e pelas palavras de motivação. Seu apoio constante foi uma fonte de força durante os momentos mais desafiadores desta trajetória.

Gostaria de fazer um agradecimento especial ao Alexandre Verdin, que foi meu professor, meu primeiro chefe, e que hoje é mais do que um amigo, faz parte da minha família. Sua amizade e apoio foram constantes ao longo dessa jornada, e sou profundamente grato por tê-lo ao meu lado.

Gostaria de expressar minha sincera gratidão ao meu orientador, Prof. Régis Henrique Gonçalves e Silva, pelo suporte contínuo, paciência e vasto conhecimento que me guiou durante todo o processo de pesquisa e redação desta tese. Sua orientação foi inestimável para o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço também ao meu coorientador, Dr. Cleber Marques, por seus conselhos valiosos, suporte e orientação ao longo desta jornada acadêmica. Sua contribuição foi crucial para o sucesso deste projeto.

Aos membros da minha banca examinadora, Prof. Milton Pereira, Prof. Arnaldo Ruben Gonzalez, Prof. Marcelo Ferreira Motta, e Prof. Nelso Gauze Bonacorso, agradeço por seus comentários perspicazes, encorajamento e questões desafiadoras que ampliaram minhas perspectivas de pesquisa. Minha gratidão vai também para o Prof. Henrique Simas, Dr. Eng., coordenador do curso, pela sua liderança e apoio contínuo.

Minha sincera gratidão vai também para meus colegas de laboratório e amigos que contribuíram com discussões estimulantes, colaborações e apoio durante as longas noites de trabalho. Em especial, agradeço ao laboratório LABSOLDA pelo suporte técnico e acesso às instalações de pesquisa.

Agradeço profundamente a todos os professores que já foram meus mestres e a todos os professores que foram meus colegas ao longo desta jornada. Vocês desempenharam um papel fundamental na minha formação acadêmica e profissional, oferecendo ensinamentos valiosos e

apoio inestimável. Suas contribuições enriqueceram minha trajetória e inspiraram meu crescimento contínuo.

Sou profundamente grato à Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) por me oportunizar a realização deste doutorado e ao Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC) por me proporcionar a graduação e o mestrado. As oportunidades e recursos oferecidos por essas instituições foram fundamentais para o meu desenvolvimento acadêmico e profissional.

Por fim, agradeço a todos os meus familiares e amigos que, de uma forma ou de outra, contribuíram para a realização deste trabalho. Sem o apoio espiritual e emocional de vocês, esta conquista não teria sido possível.

Há muito o que saber, a vida é curta, e a vida não é vida sem conhecimento.
(Baltasar Gracián, 1601-1658)

RESUMO

Procurando explorar lugares além da fronteira do conhecimento este trabalho apresenta um avanço tecnológico e científico, materializado por uma plataforma flexível e modular para exploração do processo GMAW com controle eletromecânico da transferência metálica por curto-circuito, com movimento recíprocante do arame. O funcionamento do processo baseia-se na operação controlada da transferência metálica por curto-circuito, sincronizando a onda de corrente e o movimento do arame. Foram desenvolvidas novas versões para a tocha, nas quais buscou-se mais robustez para o conjunto mecânico e o isolamento elétrico entre o motor e o arame energizado. O buffer também foi alvo de alterações, a nova versão permite uma operação mais segura, mesmo em momentos de instabilidade do processo. O conjunto de servo acionamento foi aperfeiçoado com um novo circuito eletrônico de integração, com o objetivo de blindar a placa de controle da fonte do servo driver, eliminando riscos de ruídos nos sinais de controle do motor. Ao encontrar os limites que permitiram um melhor desempenho do servomotor, foi possível produzir cordões de solda com uma taxa de deposição próxima a fontes comerciais, sem problemas de superaquecimento e com controle preciso do movimento do arame. Foram realizados ensaios com o objetivo de avaliar de que maneira cada parâmetro da onda de corrente e do movimento do arame influencia na transferência metálica. A fonte já foi utilizada para revestimento e manufatura aditiva, mostrando que o equipamento se mostra operante. A partir deste trabalho será possível desenvolver ondas sinérgicas, combinando a modulação de corrente em sincronia com modulação do movimento do arame, com objetivos diversos com total acesso a todos os parâmetros de controle do processo. Prevê-se, com isso, maior flexibilidade e, portanto, potencial de sucesso para customização do processo para diferentes condições de soldagem.

Palavras-chave: GMAW, transferência metálica, MIG-AD, revestimento, WAAM, mecatrônica.

ABSTRACT

Seeking to explore areas beyond the frontier of knowledge, this work presents a technological and scientific breakthrough, materialized by a flexible and modular platform for exploring the GMAW process with electromechanical control of short-circuit metal transfer through reciprocating wire motion. The operation of the process is based on controlled short-circuit metal transfer, synchronizing the current wave and wire movement. New versions of the torch were developed, aiming for greater robustness in the mechanical assembly and electrical insulation between the motor and the energized wire. The buffer was also modified, and the new version allows for safer operation, even during moments of process instability. The servo drive system was improved with a new electronic integration circuit to shield the control board of the power source from the servo driver's noise, eliminating risks of signal interference in motor control. By identifying the limits that allowed better performance of the servomotor, it was possible to produce weld beads with a deposition rate close to commercial power sources, without overheating issues and with precise control of wire movement. Tests were conducted to evaluate how each parameter of the current wave and wire movement influences metal transfer. The source already in operation was used in cladding and additive manufacturing, showing that the equipment is functional. From this work, it will be possible to develop synergistic waveforms, combining current modulation in sync with wire movement modulation, aimed at various objectives, with full access to all process control parameters. This promises greater flexibility and, therefore, potential success in customizing the process for different welding conditions.

Keywords: GMAW, metal transfer, MIG-AD, cladding, WAAM, mechatronics.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 - Curso da transferência metálica por curto-circuito no processo..... | 27 |
| Figura 2 – Projeto da BMW Group em seu campus de manufatura aditiva em Oberschleißheim a) Tocha do CMT em destaque b) Célula de produção da MX3D c) Peça fabricada por WAAM d) Aplicação do suporte de suspensão do carro..... | 29 |
| Figura 3 - Classificação dos modos tradicionais de transferência metálica no processo GMAW. | 34 |
| Figura 4 – Teoria moderna do equilíbrio de forças. | 35 |
| Figura 5 - Efeito da força gravitacional sobre a gota de metal líquido | 36 |
| Figura 6 - Transferência metálica no processo GMAW, $V_a = 6$ m/min, $I_{med} = 230$ A, $V_{med} = 25$ V, Gás Ar + 8% de CO ₂ 10 l/min. a) Posição Plana. b) Posição vertical. c) Posição sobre cabeça | 36 |
| Figura 7 - Variação de f_2 em função do volume da gota | 37 |
| Figura 8 - Ilustração do Efeito Pinch..... | 38 |
| Figura 9 – Simulação da distribuição das forças eletromagnéticas no processo GMAW com corrente pulsada. | 39 |
| Figura 10 - Dinâmica da temperatura dentro da gota. | 39 |
| Figura 11 - Efeito do acoplamento do arco sobre a gota..... | 40 |
| Figura 12 - Tensão superficial no metal em estado líquido..... | 41 |
| Figura 13 - Aumento das forças de tensão superficial e gravitacional devido ao diâmetro da gota | 42 |
| Figura 14 - Resultados experimentais do processo GMAW com arame 1,2 mm, arame com polaridade positiva, DBCP de 14 mm, gás de processo argônio puro, velocidade de soldagem 0,6 m/min, material de base aço ao carbono com 6 mm. a) Variação da massa da gota pela corrente; b) A força de arraste dos gases e a força gravitacional pela corrente. | 43 |
| Figura 15 - Força de arraste dos gases..... | 43 |
| Figura 16 - Distribuição da temperatura e do vapor metálico. a) Temperatura do arco, b) Vapor metálico sobreposto | 45 |
| Figura 17 - Exemplo de gota repelida pelo vapor metálico..... | 45 |
| Figura 18 - Corrente, energia, velocidade e a direção da distribuição de forças em uma gota assimétrica. a) Densidade de corrente, b) Entrada de calor, c) Temperatura, d) Velocidade, e) Força eletromagnética, f) Pressão do arco..... | 46 |

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 19 - Cálculo de velocidade e concentração de vapor metálico distribuído no arco plasma a) 170 A, b) 250 A | 47 |
| Figura 20 - Contribuição da inércia para o destacamento da gota durante o recuo do arame.. | 49 |
| Figura 21 - Quantificação da força devida à dinâmica do arame no processo GMAW | 51 |
| Figura 22 - Representação esquemática da ação das forças. | 52 |
| Figura 23 - Link para vídeo de ensaio com alteração de DBCP..... | 53 |
| Figura 24 - Representação esquemática da ação da força centrífuga no destacamento da gota. | 54 |
| Figura 25 - Tocha do SpinArc. | 54 |
| Figura 26 - Diagrama esquemático do dispositivo de vibração do eletrodo. | 56 |
| Figura 27 - Transferência de metal aprimorada pela <i>Fwd</i> | 56 |
| Figura 28 - Sequências de quadros para o destacamento de quatro gotas no teste 16 Hz-UC . | 57 |
| Figura 29 - Diagrama esquemático (esquerda) e condições de contorno (direita) do modelo de soldagem..... | 58 |
| Figura 30 - Influência do gás de processo e da corrente no modo de transferência | 59 |
| Figura 31 - Temperatura no arco plasma para o processo GMAW..... | 60 |
| Figura 32 - Efeito da gota em queda livre sobre a geometria do arco no processo MIG/MAG em modo de controle em tensão. Gás de proteção argônio e material de adição aço ao carbono. a) Geometria do arco momento antes do desprendimento da gota (0 ms), b) Geometria do arco após o desprendimento da gota (0,4 ms). | 61 |
| Figura 33 - Fração de vapor de ferro (esquerda) e temperatura (direita) e velocidade de fluxo (vetores) em para (a) 250 A, (b) 400 A e (c) 100 A, com um fluxo de entrada de vapor de ferro na ponta do arame-eletrodo (ânodo). Região considerada na simulação 15 mm de altura por 10 mm de largura. | 62 |
| Figura 34 - Cálculo da distribuição de temperatura (esquerda) e fração da massa de ferro (direita) para um ciclo do processo GMAW pulsado. | 63 |
| Figura 35 - Distribuição de temperatura calculada do arco e da peça de trabalho no plano normal à direção de soldagem (a) e distribuição de densidade de corrente na superfície da peça de trabalho (b) para um arco de 250 A com uma taxa de vaporização de arame de 1. | 63 |
| Figura 36 - Exemplos de formas de ondas de corrente projetadas para curto-circuito controlado. a) Dahein CBT; b) Stava, Linconln STT; c) EWM ColdArc; d) SP control Tawers. | 65 |
| Figura 37 - Forma de onda do CMT; a) Tensão e corrente; b) Corrente e velocidade de arame; c) imagens de alta velocidade..... | 66 |

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 38 - Perfis de superfície na transferência por curto-circuito autônoma. a) Altura de gota 1 mm. b) Altura de gota 1,5 mm. | 67 |
| Figura 39 - Alterações no raio de estrangulamento na transferência por curto-circuito autônoma. | 67 |
| Figura 40 – Perfis de superfície na transferência por curto-circuito mecânico. A) 2 ms, 5 m/min. b) 5 ms, 5 m/min. c) 5 ms, 30 m/min. d) Alteração do raio de estrangulamento. | 68 |
| Figura 41 - Oscilograma do processo com a parametrização padrão da fonte da Fronius, sem o mergulho do arame sólido na poça de fusão (experimento 1). | 71 |
| Figura 42 - Oscilograma do processo com o mergulho do arame sólido na poça de fusão (experimento 2). | 71 |
| Figura 43 - Linha do tempo do desenvolvimento do MIG-AD. | 73 |
| Figura 44 - Processo de Desenvolvimento de Produto. | 74 |
| Figura 45 - Esquemático simplificado da fonte de soldagem MIG-AD. | 77 |
| Figura 46 - MIG-AD com frequência de destacamento em 20 Hz. | 78 |
| Figura 47 - Link para vídeo do processo MIG-AD com frequência de deposição em 20 Hz. | 79 |
| Figura 48 - Ilustração da função de controle do movimento do motor. | 80 |
| Figura 49 - Distância percorrida pelo arame. | 81 |
| Figura 50 - Esquema simplificado do comando do motor. | 82 |
| Figura 51 - Conexão para comando de pulso e direção na entrada X9 do servo driver. | 82 |
| Figura 52 - Exemplificação dos pontos de medição do tempo entre comando e resposta do servomotor. | 84 |
| Figura 53 - Velocidade do driver no quinto ensaio. | 84 |
| Figura 54 – Parâmetros fixos de corrente e tempo | 85 |
| Figura 55 - Bancada do MIG-AD. | 86 |
| Figura 56 – Lógica de controle da fonte de soldagem MIG-AD. | 87 |
| Figura 57 - Oscilograma do ensaio de referência, APT 3 ms, APC 200 A e ABC 70 A. | 90 |
| Figura 58 - Oscilograma do ensaio APT 1 ms. | 90 |
| Figura 59 - Oscilograma do ensaio APT 2 ms. | 92 |
| Figura 60 - Oscilograma do ensaio APT 4 ms. | 92 |
| Figura 61 - Oscilograma do ensaio APT 5 ms. | 92 |
| Figura 62 - Oscilograma ensaio APC 50 A | 93 |
| Figura 63 - Oscilograma ensaio APC 100 A | 94 |
| Figura 64 - Oscilograma ensaio APC 150 A | 95 |
| Figura 65 - Oscilograma ensaio APC 250 A | 95 |

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 66 - Oscilograma ensaio APC 300 A | 97 |
| Figura 67 - Oscilograma ensaio APC 400 A | 98 |
| Figura 68 - Oscilograma ensaio ABC 10 A..... | 99 |
| Figura 69 - Oscilograma ensaio de referência, ABC 70 A..... | 100 |
| Figura 70 - Oscilograma ensaio ABC 30 A..... | 100 |
| Figura 71 - Oscilograma ensaio ABC 50 A..... | 100 |
| Figura 72 - Contorno das gotas sobrepostas..... | 101 |
| Figura 73 - Parâmetros fixos de tempo e corrente..... | 103 |
| Figura 74 - Oscilograma do ensaio com SPT 1,5 ms | 106 |
| Figura 75 – Frames da filmagem de alta velocidade do ensaio com SPT 1,5..... | 106 |
| Figura 76 – Oscilograma do ensaio com SPT 0,0 ms..... | 107 |
| Figura 77 - Frames da filmagem de alta velocidade do ensaio com SPT 0,0 ms..... | 107 |
| Figura 78 - Frames da filmagem de alta velocidade do ensaio com SPT 2,5 ms..... | 109 |
| Figura 79 – Oscilograma do ensaio com SPT in 2,5 ms | 110 |
| Figura 80 - Perfil das macros do ensaio 1 | 111 |
| Figura 81 – Ensaio com SPC em 100 A..... | 112 |
| Figura 82 – Ensaio com SPC em 100 A..... | 112 |
| Figura 83 – Ensaio com SPC em 200 A..... | 113 |
| Figura 84 – Ensaio com SPC em 200 A..... | 113 |
| Figura 85 - Oscilograma do modo de transferência utilizando a técnica Lexdrop..... | 115 |
| Figura 86 - Oscilograma do modo de transferência sem a técnica Lexdrop | 116 |
| Figura 87 - Sistema cartesiano de soldagem SPS..... | 117 |
| Figura 88- Trajeto da tocha no ensaio de revestimento..... | 118 |
| Figura 89 - Parâmetros fixos do ensaio de revestimento..... | 119 |
| Figura 90 - Oscilograma referente ao revestimento 1, cordão 1. | 120 |
| Figura 91 - Oscilograma referente ao revestimento 1, cordão 2 | 121 |
| Figura 92 - Fotos do revestimento 1 a) Perspectiva do revestimento; b) Segunda perspectiva do revestimento. | 121 |
| Figura 93 - Oscilograma do revestimento 2, cordão 1 | 122 |
| Figura 94 - Oscilograma expandido do revestimento 2, cordão 1..... | 123 |
| Figura 95 - Oscilograma do revestimento 2, cordão 4 | 123 |
| Figura 96 - Oscilograma expandido do revestimento 2, cordão 4..... | 123 |
| Figura 97 - Foto do revestimento 2 | 124 |
| Figura 98 - Oscilograma do revestimento 3, cordão 1 | 124 |

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 99 - Oscilograma expandido do revestimento 3, cordão 1..... | 124 |
| Figura 100 - Oscilograma do revestimento 3, cordão 4 | 125 |
| Figura 101 - Oscilograma expandido do revestimento 3, cordão 4..... | 125 |
| Figura 102 - Fotos do revestimento 3 a) Perspectiva do revestimento; b) Segunda perspectiva do revestimento | 125 |
| Figura 103 - Oscilograma do revestimento 4, cordão 1 | 126 |
| Figura 104 - Oscilograma expandido do revestimento 4, cordão 1..... | 126 |
| Figura 105 - Oscilograma do revestimento 4, cordão 4 | 126 |
| Figura 106 - Oscilograma expandido do revestimento 4, cordão 4..... | 127 |
| Figura 107 - Fotos do revestimento 4 a) Perspectiva do revestimento; b) Foto superior do revestimento | 127 |
| Figura 108 - QRCode para vídeos do processo de revestimento. a) Link para o vídeo do revestimento 3; b) Link para o revestimento 4..... | 127 |
| Figura 109 - Macrografias dos revestimentos. a) Revestimento 1. b) Revestimento 2. c) Revestimento 3. d) Revestimento 4, e) Referência | 128 |
| Figura 110 - Equipamentos utilizados para a produção dos ensaios e aquisição dos dados de soldagem. a) Bancada de Trabalho MIG-AD; b) Sistema de fixação de peças na base refrigerada; c) Sistema de aquisição de dados de soldagem (SAP); d) Sensor de contato; e) Software de aquisição de dados para o motor de servo e controlador do manipulador cartesiano. | 130 |
| Figura 111 - Bancada para realização do ensaio de fabricação de parede | 131 |
| Figura 112 - Parâmetros utilizados..... | 132 |
| Figura 113 – Parede 1, referência do ensaio..... | 133 |
| Figura 114 – Parede 2, fabricada utilizando a primeira estratégia. | 134 |
| Figura 115 – Parede 3, fabricada utilizando a segunda estratégia..... | 135 |
| Figura 116 – Parede 4, parede com 40 camadas, 60 mm de altura. | 135 |
| Figura 117 - Macros das paredes com a dimensão da largura útil. a) Parede 1, parede de referência; b) Parede 2, estratégia 1; c) Parede 3, estratégia 2; d) Parede 4, 40 camadas utilizando a estratégia 2. | 136 |
| Figura 118 - Pontos de medição das paredes com paquímetro..... | 136 |
| Figura 119 - Gráfico com as medições feitas das alturas das paredes utilizando um paquímetro | 137 |
| Figura 120 - Segunda versão do buffer com destaque as principais modificações. | 151 |

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 121 - Buffer a) Vista explodida dos componentes que compõem o buffer; b) Placa de circuito impresso do sensor e c) Detalhes dos componentes de fixação do condúite. | 152 |
| Figura 122 – Buffer atualizado. a) Vista explodida do buffer; b) Vista frontal sem a tampa principal; c) Perspectiva do buffer; d) Mecanismo de transmissão do movimento para o sensor; e) Vista da tampa de um dos porta pinça; f) Porta pinça desmontado da tampa; g) Detalhes da porta pinça. | 153 |
| Figura 123 - Tocha desenvolvida anterior a este trabalho..... | 154 |
| Figura 124 – Primeiro modelo de tocha desenvolvido. a) Tocha com suporte para pegada manual; b) Pescoço da tocha refrigerado; c) Mecanismo de acoplamento do motor ao rolete; d) Guias para o arame em nylon; e) Detalhe para o formato quadrado do eixo em aço do rolete; f) Area de contato do eixo quadrado com o acoplamento em PLA. | 156 |
| Figura 125 - Ilustração da bancada para filmagem silmultânea do arame e do rolete responsável pelo movimento do arame. | 157 |
| Figura 126 - Medição do deslocamento angular do rolete e linear do arame..... | 158 |
| Figura 127 - Projeto atualizado da tocha; a)Vista completa da tocha reta sem refrigeração; b) Novo eixo e acoplamento com rasgo de chaveta; c) Flange para acomodação do novo acoplamento; d) Fixador da tocha reta; e) Bicos de contato responsáveis por guiar o arame. | 160 |
| Figura 128 - Descrição dos parâmetros da onda de corrente..... | 161 |
| Figura 129 – Onda de corrente e tensão com destaque para as diferentes fases do firmware para o processo MIG-AD convencional. | 162 |
| Figura 130 - Fluxograma de decisões da Fase 0 do software para o MIG-AD Convencional | 162 |
| Figura 131 - Fluxograma de decisões para a Fase 1 do software para o MIG-AD Convencional. | 163 |
| Figura 132 - Fluxograma de decisões para a Fase 2 do software para o MIG-AD Convencional. | 163 |
| Figura 133 - Fluxograma de decisões para a Fase 3 do software para o MIG-AD Convencional. | 163 |
| Figura 134 - Fluxograma de decisões para a Fase 4 do software para o MIG-AD Convencional. | 164 |
| Figura 135 - Fluxograma de decisões para a Fase 5 do software para o MIG-AD Convencional. | 164 |

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 136 - Fluxograma de decisões para a Fase 6 do software para o MIG-AD Convencional. | 165 |
| Figura 137 - Fluxograma de decisões para a Fase 7 do software para o MIG-AD Convencional. | 165 |
| Figura 138 - Fluxo de fases do software da fonte MIG-AD simplificado..... | 165 |
| Figura 139 - Link para filmagem de alta velocidade do processo para auxiliar no entendimento do fluxo das fases do firmware..... | 165 |
| Figura 140 - Fluxograma de decisões para a Fase A do software para a abertura do arco. ... | 166 |
| Figura 141 - Fluxograma de decisões para a Fase B do software para a abertura do arco..... | 167 |
| Figura 142 - Fluxograma de decisões para a Fase C e para a abertura do arco..... | 167 |
| Figura 143 - Fluxograma de decisões para a Fase D do software para a abertura do arco ... | 168 |
| Figura 144 - Fluxograma de decisões para a Fase E do software para a abertura do arco..... | 168 |
| Figura 145 - Fluxo de fases do processo de abertura do arco na fonte MIG-AD..... | 169 |
| Figura 146 - Link para filmagem de alta velocidade da abertura do arco..... | 169 |
| Figura 147 - Link para filmagem de alta velocidade da rotina para desgrudar arame. | 169 |
| Figura 148 – Resultado do terceiro ensaio: Perfil de velocidade para diferentes <i>setpoints</i> | 172 |
| Figura 149 - Resultado do terceiro ensaio: Ampliação da curva de velocidade para diferentes <i>setpoints</i> | 172 |
| Figura 150 – Resultado do terceiro ensaio: Velocidades e acelerações máximas..... | 173 |
| Figura 151 – Resultado do terceiro ensaio: Comportamento do deslocamento do motor..... | 174 |
| Figura 152 – Resultado do terceiro ensaio: Deslocamento amplitude do movimento. | 174 |
| Figura 153 – Resultado do terceiro ensaio: Atraso entre o comando do driver e a resposta do motor..... | 175 |
| Figura 154 - Curva de velocidade de arame idealizada..... | 176 |
| Figura 155 – Resultado do quarto ensaio para um ΔT de 1 ms: Perfil de velocidade para diferentes <i>setpoints</i> | 178 |
| Figura 156 – Resultado do quarto ensaio para um ΔT de 1 ms: Deslocamento amplitude do movimento..... | 179 |
| Figura 157 – Resultado do quarto ensaio para um ΔT de 1 ms: Tempo entre comando do driver e resposta do motor..... | 179 |
| Figura 158 – Resultado do quarto ensaio para um ΔT de 2 ms: Perfil de velocidade para diferentes <i>setpoints</i> | 180 |
| Figura 159 – Resultado do quarto ensaio para um ΔT de 2 ms: Deslocamento amplitude do movimento..... | 180 |

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 160 – Resultado do quarto ensaio para um ΔT de 2 ms: Tempo entre comando do driver e resposta do motor..... | 181 |
| Figura 161 – Resultado do quarto ensaio para um ΔT de 3 ms: Perfil de velocidade para diferentes configurações..... | 182 |
| Figura 162 – Resultado do quarto ensaio para um ΔT de 3 ms: Deslocamento amplitude do movimento..... | 182 |
| Figura 163 – Resultado do quarto ensaio para um ΔT de 3 ms: Tempo entre comando do driver e resposta do motor..... | 183 |
| Figura 164 - Perfil de velocidade para as diferentes configurações do ensaio 4.4..... | 184 |
| Figura 165 - Deslocamento e amplitude total do movimento do ensaio 4.4..... | 184 |
| Figura 166 - Tempo entre comando e resposta do ensaio 4.4..... | 184 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 1 - Corrente de transição para o processo GMAW, em função do gás de proteção, material e diâmetro do arame | 59 |
| Tabela 2 - Correntes típicas de curto-circuito requeridas para a transferência de metal..... | 64 |
| Tabela 3 - Parâmetros comuns dos testes feitos para avaliar o mergulho do arame sólido na poça de fusão..... | 69 |
| Tabela 4 - Parâmetros dos experimentos 1 e 2 para avaliar o mergulho do arame sólido na poça de fusão..... | 70 |
| Tabela 5 - Composição química do metal de adição (ER70S-6)..... | 75 |
| Tabela 6 - Composição química da chapa | 75 |
| Tabela 7 - Velocidade de regime do motor. | 83 |
| Tabela 8 - Ensaio 1, alterando o valor do tempo de pulso no arco (APT) | 88 |
| Tabela 9 - Ensaio 2, alterando o valor da corrente de pulso no arco..... | 93 |
| Tabela 10 - Ensaio 3, alterando o valor da corrente de base no arco | 98 |
| Tabela 11 - Ensaio 1, alterando o valor do tempo de pulso no curto | 105 |
| Tabela 12 - Ensaio 1, resultado das medições das macros. | 110 |
| Tabela 13 - Ensaio 2, variando a amplitude da corrente de pulso no curto com um período de 1,5 ms. | 111 |
| Tabela 14 - Ensaio 2, resultado das macros..... | 113 |
| Tabela 15 - Ensaio de revestimento 1..... | 120 |
| Tabela 16 – Resultado dos ensaios de revestimento 2, 3 e 4..... | 121 |
| Tabela 17 - Medições dos revestimentos 1, 2, 3 e 4..... | 129 |
| Tabela 18 - Resultados da parede de referência | 133 |
| Tabela 19 - Resultados do ensaio da primeira estratégia, 0,5 s no final de cada cordão..... | 134 |
| Tabela 20 - Resultados do ensaio da segunda estratégia, 0,5 s no início de cada cordão | 134 |
| Tabela 21 – Parâmetros para o terceiro ensaio: Velocidade em movimento oscilatório de 100 Hz | 170 |
| Tabela 22 - Parâmetros para o quarto ensaio..... | 177 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A ampere

\vec{a} Aceleração

a_G Aceleração do Centro de Massa

A_p Área da Gota Projetada em um Plano Perpendicular ao Escoamento do Gás de Processo

Ar Argônio

C_D Coeficiente de Arrasto

cm Centímetro

CMT Cold Metal Transfer

CO_2 Dióxido de Carbono

D Diâmetro

d_{gota} Diâmetro da Gota

DBCP Distância Bico de Contato Peça

EB-DED Electron Beam Direct Energy Deposition

F Força

\vec{F} Força Vetorial

F_a Força de Arraste dos Gases

F_{em} Força Eletromagnética

F_g Força Gravitacional

F_v Força de Vaporização

F_γ Força Devida a Tensão Superficial

F_{wd} Força Devida a Dinâmica do Arame

g Aceleração da Gravidade

GMAW Gas Metal Arc Welding

GMA-DED Gas Metal Arc

GTA-DED Gas Tungsten Arc

Hz hertz

I Corrente

I_c Corrente Crítica

I_{mp} Impulso

K kelvin

k Constante (0,75)

L_E Calor Latente de Evaporação por mol

L-DED Laser-Direct Energy Deposition

m Massa

M Massa Molar

MA Manufatura Aditiva

MIG-AD Equipamento de soldagem GMAW com Alimentação Dinâmica

N newton

O_2 Oxigênio

ρ Densidade

P Pressão Normal

P_a pascal

PA-DED Plasma Arc

ρ_f Densidade do Gás de Processo

P_{fem} Pressão Devido a Força Eletromagnética

Q_{Final} Quantidade de movimento final

$Q_{Inicial}$ Quantidade de movimento inicial

R Raio

R_g Constante Universal dos Gases

SAE1020 Aço Com Aproximadamente 0,2% de Carbono

T_a Temperatura do arco

T Temperatura

t Tempo

U Tensão

V_f Velocidade dos gases

V_L Volume molar do líquido

V_V Volume molar do vapor

μ Permeabilidade magnética

θ Ângulo

γ Tensão Superficial

∂ Derivada

$\Delta \vec{v}$ Variação da velocidade

Δt variação do tempo

$\Delta \vec{Q}$ Variação da quantidade de movimento

ΣF Somatório das forças

ΔL Variação linear do arame

$\Delta \emptyset$ Variação angular do rolete

SUMÁRIO

| | | |
|--------------|--------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 27 |
| 1.1 | JUSTIFICATIVA E CARÁTER DE INOVAÇÃO | 30 |
| 1.2 | OBJETIVOS | 31 |
| 1.2.1 | Objetivo Geral..... | 31 |
| 1.2.2 | Objetivos Específicos | 31 |
| 2 | FUNDAMENTOS CIENTÍFICO-TECNOLÓGICOS..... | 33 |
| 2.1 | Física da transferência metálica no processo GMAW | 33 |
| 2.1.1 | A teoria moderna do equilíbrio de forças..... | 34 |
| 2.1.1.1 | <i>Força gravitacional.....</i> | 35 |
| 2.1.1.2 | <i>Força eletromagnética.....</i> | 36 |
| 2.1.1.3 | <i>Força devido à tensão superficial do metal fundido</i> | 40 |
| 2.1.1.4 | <i>Força de arraste dos gases.....</i> | 42 |
| 2.1.1.5 | <i>Força de vaporização.....</i> | 44 |
| 2.1.2 | Força devida à dinâmica do arame | 47 |
| 2.1.2.1 | <i>Força devido a dinâmica do arame (Fwd) no processo MIG-AD</i> | 48 |
| 2.1.2.2 | <i>Força devido a dinâmica do arame (Fwd) no CMT</i> | 52 |
| 2.1.2.3 | <i>Fwd na rotação do arame-eletrodo.....</i> | 54 |
| 2.1.2.4 | <i>Fwd na vibração do arame-eletrodo</i> | 55 |
| 2.1.2.5 | <i>Fwd na pulsação do arame-eletrodo</i> | 57 |
| 2.1.3 | Corrente de Transição..... | 58 |
| 2.1.4 | Influência da gota na termodinâmica do arco elétrico no processo GMAW . | 59 |
| 2.1.5 | Transferência metálica por curto-circuito | 64 |
| 2.1.5.1 | <i>Mergulho do arame sólido na poça de fusão</i> | 69 |
| 3 | Materiais, equipamentos e metodologia | 73 |
| 3.1 | Materiais e equipamentos | 73 |
| 3.2 | Metodologia..... | 75 |

| | | |
|--------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 4 | Resultados e discussões | 77 |
| 4.1 | Fonte MIG-AD | 77 |
| 4.1.1 | Análise do movimento do motor..... | 77 |
| 4.1.1.1 | <i>Primeiro ensaio: Distância</i> | <i>80</i> |
| 4.1.1.2 | <i>Segundo ensaio: Velocidade em regime.....</i> | <i>81</i> |
| 4.1.1.3 | <i>Ajustes do PID do servo driver.....</i> | <i>83</i> |
| 4.2 | Análise da Transferência metálica no MIG-AD..... | 85 |
| 4.2.1 | Análise da onda de corrente na fase de arco da transferência metálica..... | 85 |
| 4.2.1.1 | <i>Resultados e discussões</i> | <i>88</i> |
| 4.2.1.2 | <i>Considerações.....</i> | <i>101</i> |
| 4.2.2 | Análise do efeito do pulso de corrente na fase de curto-circuito sobre a transferência metálica | 102 |
| 4.2.2.1 | <i>Resultados e discussões</i> | <i>105</i> |
| 4.2.2.2 | <i>Considerações.....</i> | <i>113</i> |
| 4.2.3 | Lexdrop..... | 114 |
| 4.2.4 | Aplicação do MIG-AD em revestimento..... | 116 |
| 4.2.4.2 | <i>Resultados e discussões</i> | <i>119</i> |
| 4.2.4.3 | <i>Considerações.....</i> | <i>129</i> |
| 4.2.5 | Aplicação do MIG-AD em WAAM..... | 129 |
| 4.2.5.2 | <i>Resultados e discussões</i> | <i>132</i> |
| 4.2.5.3 | <i>Considerações.....</i> | <i>137</i> |
| 5 | CONCLUSÕES..... | 138 |
| 6 | SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS | 140 |
| | REFERÊNCIAS..... | 141 |
| | APÊNDICE 1 – Projeto detalhado do buffer | 151 |
| | APÊNDICE 2 – Projeto detalhado da tocha | 154 |
| | APÊNDICE 3 – Código fonte da fonte de soldagem MIG-AD | 161 |

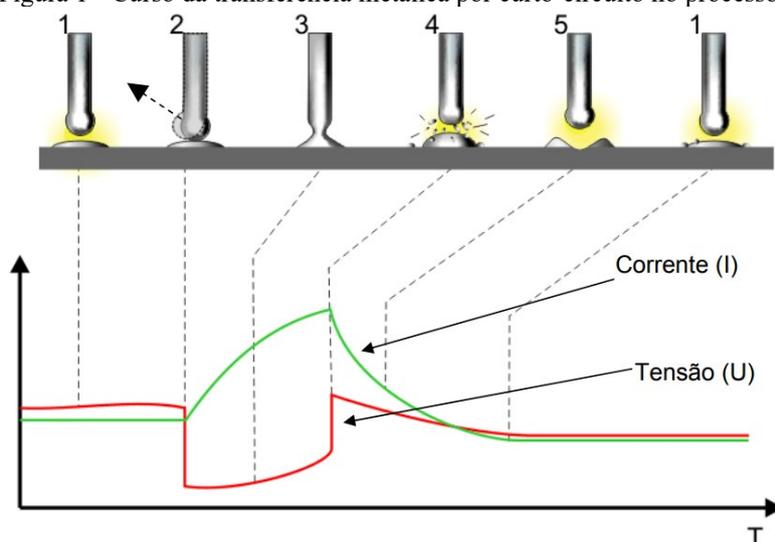
| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| APÊNDICE 4 – Análise do movimento do motor, teste de velocidade em movimentos oscilatórios de 100 Hz | 170 |
| APÊNDICE 5 – Análise do movimento do motor, avaliação da estratégia de alteração de velocidade antes da inversão | 176 |

1 INTRODUÇÃO

Dentre os processos de soldagem, o processo MIG/MAG (*Metal Inert Gas/Metal Active Gas*), também chamado por GMAW (*Gas Metal Arc Welding*), é amplamente adotado em ambientes de produção de alta velocidade, estabelecendo-se como um processo essencial em diversos setores industriais. A introdução da alimentação dinâmica de arame em fontes de soldagem GMAW marcou o início de uma era de inovações. Este processo, denominado como GMAW-DF (*GMAW Dynamic Feed*), incorpora a funcionalidade de avanço e recuo do arame, comumente utilizando para tal um servomotor integrado a tocha de soldagem.

A inovação do GMAW-DF surgiu como solução para os desafios enfrentados na soldagem GMAW com transferência por curto-circuito. Neste modo de transferência, a corrente média é inferior ao valor da corrente de transição. Quando a gota de metal entra em contato com a poça de fusão, a tensão superficial da poça atua a favor do desprendimento da gota, enquanto o calor gerado pelo efeito joule aquece o arame. Simultaneamente, a pressão do campo eletromagnético ao redor da ponte metálica comprime o metal líquido até que este se rompa, permitindo que o arco elétrico seja aberto, como ilustrado na Figura 1.

Figura 1 - Curso da transferência metálica por curto-circuito no processo.



Fonte: [1]

Com o objetivo resolver este problema, algumas tecnologias foram desenvolvidas, como por exemplo o Dahein CBT, Stava, Lincoln STT, EWM ColdArc e

o SP control Tawers. O desafio destas tecnologias surge na detecção prévia do curto-circuito para que haja tempo hábil para a redução da corrente antes do rompimento da ponte metálica.

O CMT (*Cold Metal Transfer*), desenvolvido pela empresa Fronius [2], foi o precursor da tecnologia GMAW-DF. Inicialmente desenvolvida para aplicação de união de juntas dissimilares, a tecnologia CMT representa um grande avanço para a indústria automotiva, a indústria de equipamentos médicos e alimentícios que se utilizam de materiais como aço, aços-boro, aço revestido com zinco [3], aço inoxidável e alumínio [4][5] entre outras juntas mistas [6][7]. Também se utiliza em aplicações de revestimento [8], comuns para o setor de mineração [9], encontrando nesta tecnologia uma menor diluição no material de base [10].

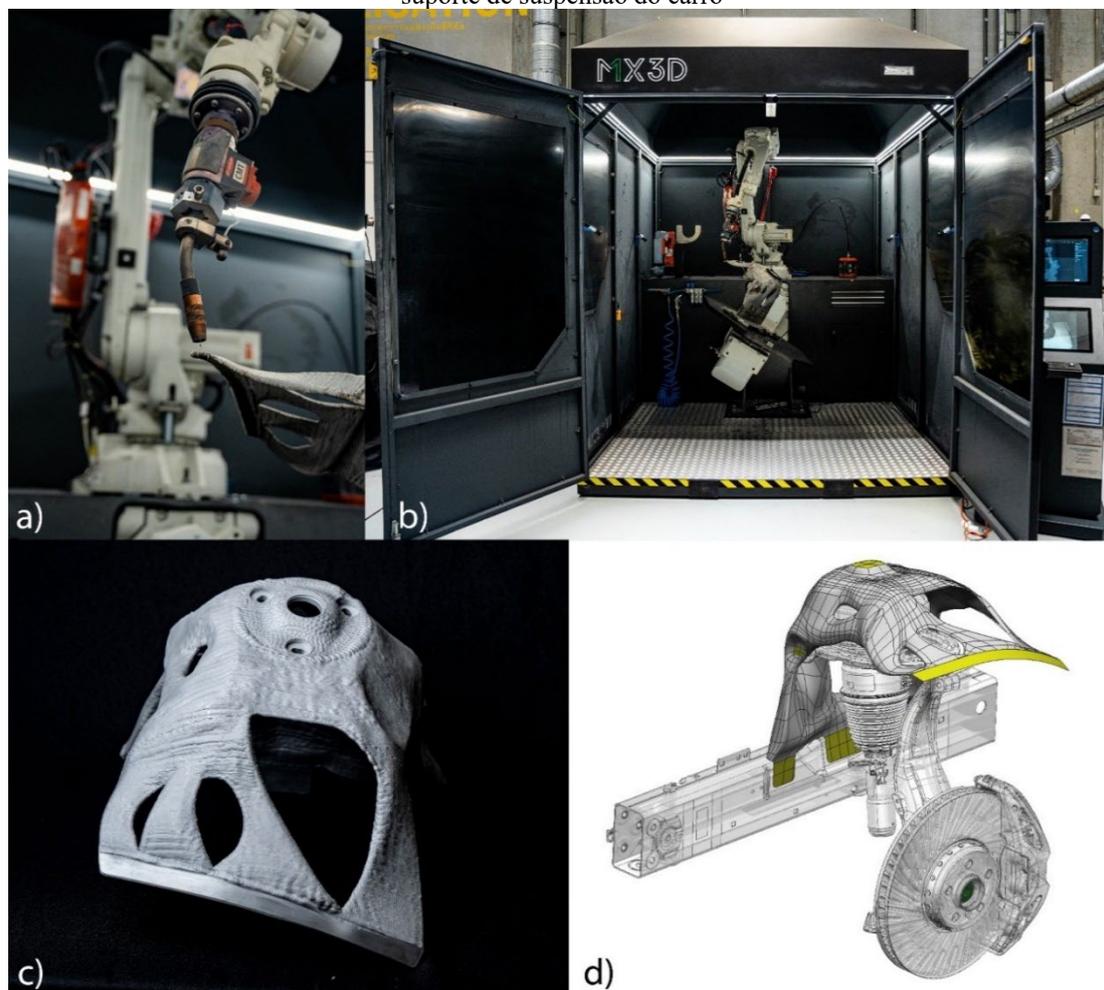
Empresas como a MX3D e a Gefertec utilizam a fonte de soldagem CMT, em suas células de manufatura aditiva por WAAM (*Wire Arc Additive Manufacturing*), comumente integrando um robô antropomórfico e uma fonte de soldagem CMT, utilizando um software dedicado. A empresa BMW Group, fabricante de carros BMW, MINI e Rolls-Royce, tem avançado em pesquisas com WAAM para fabricação de peças para seus carros [11], como é o caso do suporte para amortecedor, concebido em uma célula de fabricação da empresa MX3D, apresentado na Figura 2.

A indústria de petróleo e gás busca utilizar a tecnologia CMT para a aplicações com Inconel 718 [12] e Inconel 625 [13]. Pesquisas mais recentes procuram utilizar a tecnologia WAAM para fabricar derivações em pipeline [14], e até mesmo produzir peças de reposição diretamente na plataforma offshore, reduzindo custos e tempo de espera [15]. Atualmente o software responsável pela integração de impressoras WAAM permite controlar os parâmetros do robô e escolher o programa sinérgico que a fonte de soldagem disponibiliza. Essa limitação do acesso aos parâmetros da fonte é necessária para facilitar o uso do equipamento, pois, ao modificar apenas um parâmetro, é possível tornar o processo instável.

A dificuldade de parametrizar a fonte de soldagem GMAW-DF levou a Fronius a desenvolver diferentes programas sinérgicos. A robustez e a confiabilidade da fonte carregam consigo uma desvantagem, a falta de flexibilidade para o uso da fonte em pesquisas avançadas. O avanço acelerado em WAAM despertou uma necessidade da manipulação de todos os parâmetros da fonte de soldagem, que permita

o desenvolvimento de novas ondas de corrente, novas técnicas avançadas do movimento do arame ou até mesmo a simples otimização dos programas já existentes [16].

Figura 2 – Projeto da BMW Group em seu campus de manufatura aditiva em Oberschleißheim a) Tocha do CMT em destaque b) Célula de produção da MX3D c) Peça fabricada por WAAM d) Aplicação do suporte de suspensão do carro



Fonte: [17]

Visualizando esta janela de oportunidade o Laboratório de Soldagem e Mecatrônica LABSOLDA, empenhou recursos no desenvolvimento de uma fonte de soldagem GMAW-DF proprietária, nomeada MIG-AD. O sufixo AD (Alimentação Dinâmica) foi concebida pelo LABSOLDA originalmente para o processo TIG [18] e vem sendo aplicada também para o GMAW. De fato, não obstante, outras instituições têm usado o termo “dynamic feed” como o TIP TIG, inventado por Siegfried Plasch em 1999 [19], ou por vezes o termo “dynamic wire feed” como em trabalhos desenvolvidos para apresentar a tecnologia CMT [20]. A designação de alimentação dinâmica de arame refere-se ao comportamento físico do sistema, onde não há uma condição de regime

estático. Em vez disso, o sistema opera em um regime dinâmico, onde ocorrem acelerações e desacelerações contínuas. Isso significa que as forças devido a dinâmica do arame atuam de maneira predominante frente as forças convencionais que regem o regime de forças estáticas da transferência metálica.

A fonte de soldagem MIG-AD apresenta-se como uma das mais tecnológicas fontes de soldagem da atualidade, em termos de flexibilidade de ajustes da onda de corrente e no movimento do arame, como será demonstrado no decorrer deste trabalho. O controle eletromecânico da movimentação do arame, aliado ao controle da curva de corrente, representa um substancial progresso tecnológico do processo GMAW-DF, permitindo pesquisas mais aprofundadas sobre a transferência metálica, possibilitando a alteração de quaisquer parâmetros do processo. Nos últimos anos, o LABSOLDA tem reunido esforços para melhorar o entendimento a respeito desta tecnologia [21][22].

1.1 JUSTIFICATIVA E CARÁTER DE INOVAÇÃO

Embora compreenda um vasto campo de conhecimento no campo da soldagem, o desenvolvimento do processo GMAW com alimentação dinâmica ainda é pouco investigado, devido às limitações impostas por fabricantes detentores da tecnologia. Afinal, tecnologias similares já apresentam aplicações inovadoras nos campos da manufatura aditiva, soldagem de materiais dissimilares e ótimos resultados em áreas tradicionais da soldagem com a redução de fumos e respingos, contribuindo para uma indústria mais verde e sustentável. Entretanto, os trabalhos encontrados a respeito das variantes do GMAW-DF abordam questões envolvendo a aplicação do processo ou de metalurgia, sendo pouco explorado os aspectos técnicos e científicos atrelados ao aprimoramento do sistema e ao melhor entendimento da física da transferência metálica.

O aprimoramento dos equipamentos utilizados no processo MIG-AD exige investimento e conhecimento no campo da mecatrônica e da soldagem, imos do LABSOLDA. Pesquisas anteriores são a base deste trabalho que se apresenta como um avanço na fronteira do conhecimento.

Os principais desafios já abordados em trabalhos tecnológico-científicos do LABSOLDA foram o desenvolvimento de uma tocha, com um motor acoplado para o movimento do arame, uma fonte de soldagem com código aberto para integração com o servo driver e um buffer. No entanto, persistiram lacunas de conhecimento e tecnologias, que este trabalho visa preencher. Esses desafios incluem a complexa integração da

eletrônica da fonte de soldagem com o servo driver, dificuldades na instalação e no uso em operação do buffer, e a complexa tarefa de sincronizar os comandos de corrente com os movimentos do motor em movimentos de alta frequência de inversão de direção, sempre mantendo o controle do movimento do arame. É crucial manter o controle do movimento do arame para evitar que ele colida com o fundo da poça de fusão ou retroceda até o bico de contato, o que pode resultar em superaquecimento do motor ou fusão do bico de contato, respectivamente.

No que tange as aplicações, o MIG-AD, ou GMAW-DF, permite a otimização em aplicações nas quais se permite uma elevada controlabilidade sobre a geometria do cordão, penetração e aporte de calor são decisivas, como em revestimento [23], [24] e passe de raiz [25].

1.2 OBJETIVOS

Neste capítulo serão apresentados os objetivos deste trabalho, iniciando pelo objetivo geral e detalhando em seguida os objetivos específicos. O propósito central deste trabalho está relacionado com a transferência metálica no processo GMAW-DF e o sistema mecatrônico responsável pelo controle do movimento do arame.

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é desenvolver um sistema de controle eletromecânico da transferência metálica por curto-circuito visando a busca por uma maior compressão do processo de soldagem GMAW-DF.

1.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste estudo são desdobramentos do objetivo geral e norteiam o trabalho na busca de atingir as metas propostas. Sendo os objetivos:

- Aperfeiçoar o sistema mecatrônico responsável pelo controle da transferência metálica;
- Compreender e quantificar o desempenho do servomotor;
- Implementar novas rotinas de controle no software da fonte;
- Aprimoramento do conjunto de parâmetros de controle em busca de aperfeiçoar o modo de transferência;

- Investigar a influência dos parâmetros de corrente na transferência metálica;
- Avaliar o uso da fonte de soldagem MIG-AD para revestimento;
- Avaliar a resposta da fonte de soldagem MIG-AD na fabricação de paredes por MA.

2 FUNDAMENTOS CIENTÍFICO-TECNOLÓGICOS

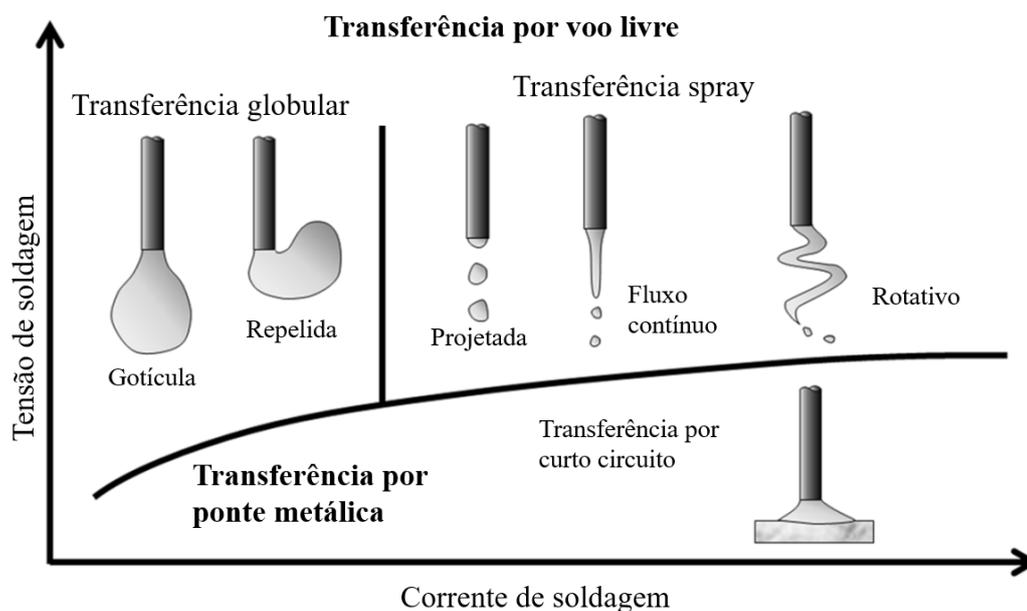
A análise detalhada da transferência metálica se faz necessário neste trabalho. Na busca por um melhor entendimento dos fenômenos físicos envolvidos na transferência metálica controlada por um sistema mecatrônico, figura o MIG-AD como estado da arte dos processos de soldagem. A tecnologia MIG-AD pode trazer não só novos resultados, mas também novos questionamentos quanto à transferência metálica mecanicamente assistida.

2.1 FÍSICA DA TRANSFERÊNCIA METÁLICA NO PROCESSO GMAW

A literatura apresenta duas teorias, comumente utilizadas em modelos matemáticos, para a transferência metálica no processo GMAW. A primeira seria a teoria da instabilidade Pinch para quando são utilizados valores de corrente superiores a corrente de transição, possibilitando a análise do modo de transferência spray, baseado na instabilidade Rayleigh [26]. A segunda seria a teoria do balanço de forças estáticas, aplicada ao processo GMAW que utiliza valores de corrente abaixo da corrente de transição. Esta teoria é comumente aplicada ao estudo da transferência globular, contudo, pode ser aplicada ao estudo da transferência metálica do processo GMAW-DF. A fonte MIG-AD, como também o CMT, tem a capacidade de depositar cada gota individualmente, em movimentos coordenados com a onda de corrente. Assim, elimina a necessidade de projetar a gota em voo livre ou de lidar com a complexa tarefa de prever a reabertura do arco na transferência por curto-circuito. Ambos estão apresentados na Figura 3 e dispostos em um gráfico, o qual relaciona a tensão e a corrente com os modos de transferência.

A literatura apresenta as seguintes forças como forças representativas na mecânica do destacamento da gota no processo de soldagem GMAW para o modo de transferência globular: 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 a força de vaporização (F_v). O domínio das forças eletromagnéticas no processo GMAW em condições acima da corrente de transição justifica a abordagem por uma teoria diferente, a teoria Pinch.

Figura 3 - Classificação dos modos tradicionais de transferência metálica no processo GMAW.



Fonte: Adaptado de [27]

A faixa da corrente de transição é influenciada por diferentes fatores, como a polaridade da corrente, o gás de processo, a composição do eletrodo, a geometria do eletrodo, o stick-out, entre outros fatores que serão abordados no decorrer deste trabalho [28][29]. O gás de processo tem o seu papel indispensável no processo de soldagem, contudo, ele pode alterar as condições de contorno, sendo necessário uma análise mais detalhada das influências do gás de processo na física da transferência metálica.

O item a seguir apresenta uma nova perspectiva da teoria do balanço de forças, em que se inclui uma nova força, a força devido a dinâmica do arame. São apresentadas as forças já incluídas na teoria tradicional, com os complementos de trabalhos atuais, como também modelos computacionais que trazem consigo um entendimento aprofundado dos fenômenos físicos que envolvem o processo de soldagem GMAW.

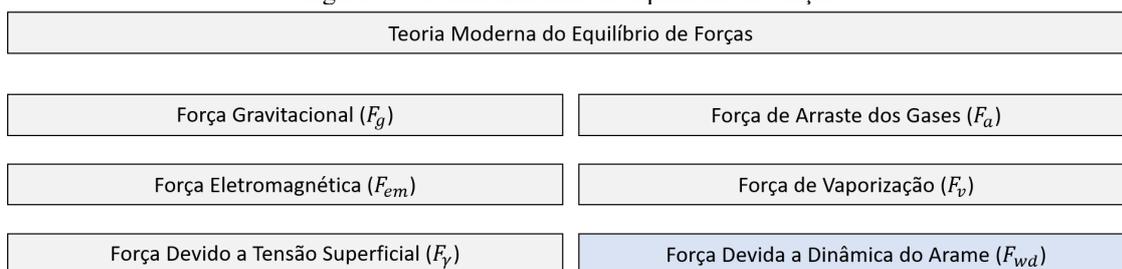
2.1.1 A teoria moderna do equilíbrio de forças

A soldagem é uma área em constante evolução devido ao rápido avanço da tecnologia aplicada às fontes de soldagem. Analisar o formato de onda de corrente ou tensão é uma prática comum para melhorar os resultados da soldagem, reduzir respingos [30] e aumentar a performance [31] do processo. Pesquisas comparando diferentes tecnologias aplicadas à transferência metálica [32] ou a influência do gás de processo no

cordão de solda [33] são fundamentais para a análise da transferência metálica no processo GMAW. A alimentação dinâmica do arame no processo GMAW é uma tecnologia disruptiva que adiciona novos elementos à física da transferência metálica.

A dinâmica do arame no processo GMAW adiciona uma nova componente de força, nomeada como força devido à dinâmica do arame (F_{wd}), que pode influenciar o cordão de solda de várias maneiras, dependendo do tipo de dinâmica atribuída ao arame. Existem duas principais teorias na literatura que descrevem a física da transferência metálica: a Teoria do Equilíbrio de Forças Estáticas e a Teoria Pinch [34]. A primeira é usada para processos com o nível de corrente média inferior a corrente de transição [35], enquanto a segunda é utilizada para processos acima da corrente de transição. No entanto, nenhuma dessas teorias considera a contribuição da dinâmica do arame para a física da transferência metálica.

Figura 4 – Teoria moderna do equilíbrio de forças.



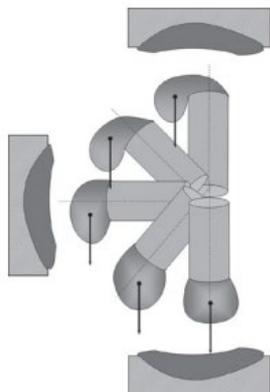
Fonte: Autor

Ao longo deste trabalho é apresentada a teoria do equilíbrio de forças estáticas, a teoria da instabilidade Pinch, os modos de transferência por curto-circuito e por fim será apresentado em detalhes as tecnologias que utilizam a F_{wd} para aperfeiçoar as técnicas de deposição de gotas.

2.1.1.1 Força gravitacional

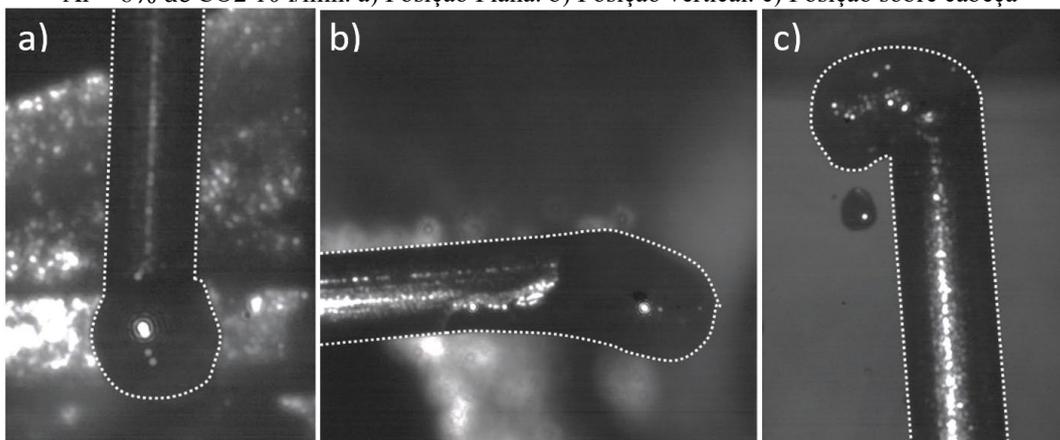
A força gravitacional (F_g) tem ação sobre a gota de material fundido até mesmo após o seu desprendimento do arame-eletrodo. É atuante no sentido do destacamento da gota na posição plana, enquanto em outras posições a F_g apresenta componentes no sentido contrário ao destacamento, como é possível constatar na Figura 5 e nas imagens apresentadas na Figura 6.

Figura 5 - Efeito da força gravitacional sobre a gota de metal líquido



Fonte: [34]

Figura 6 - Transferência metálica no processo GMAW, $V_a = 6$ m/min, $I_{med} = 230$ A, $V_{med} = 25$ V, Gás Ar + 8% de CO₂ 10 l/min. a) Posição Plana. b) Posição vertical. c) Posição sobre cabeça



Fonte: Autor.

Pode-se calcular F_g a partir da equação (1), a qual apresenta o diâmetro da gota (d_{gota}), a densidade do metal líquido (ρ) e a aceleração da gravidade (g). A partir desta equação pode-se concluir que o diâmetro da gota é determinante para o efeito de F_g sobre o destacamento da gota. [34]

$$F_g = \frac{\pi}{6} d_{gota}^3 \rho g \quad (1)$$

2.1.1.2 Força eletromagnética

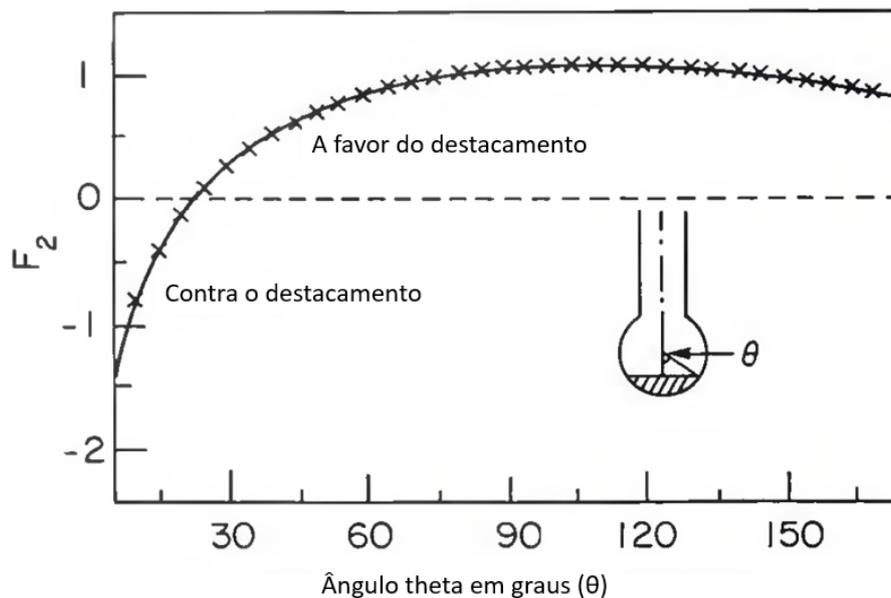
A força eletromagnética (F_{em}) está presente em todo o comprimento do eletrodo energizado, causando impactos apenas no condutor, em estado líquido, e no plasma. A

pressão axial resultante da F_{em} autoinduzida no condutor pode ser calculada utilizando a permeabilidade magnética (μ) e a corrente (I) como na equação (2), o valor de f_2 é definido a partir do raio da gota (R) e o ângulo do plano de relação a gota (θ), como na equação (3). A variação do ângulo (θ) em relação ao volume da gota é ilustrado na Figura 7. Já o fluxo de energia eletromagnética por unidade de área por unidade de tempo (potência/área) pode ser calculado pelo vetor de Poynting [36].

$$F_{em}(r) = \frac{\mu I^2}{4\pi^2} f_2 \quad (2)$$

$$f_2 = \left[\ln \frac{R \sin \theta}{r} - \frac{1}{4} - \frac{t}{1 - \cos \theta} + \frac{2}{(1 - \cos \theta)^2} \ln \frac{2}{1 + \cos \theta} \right] \quad (3)$$

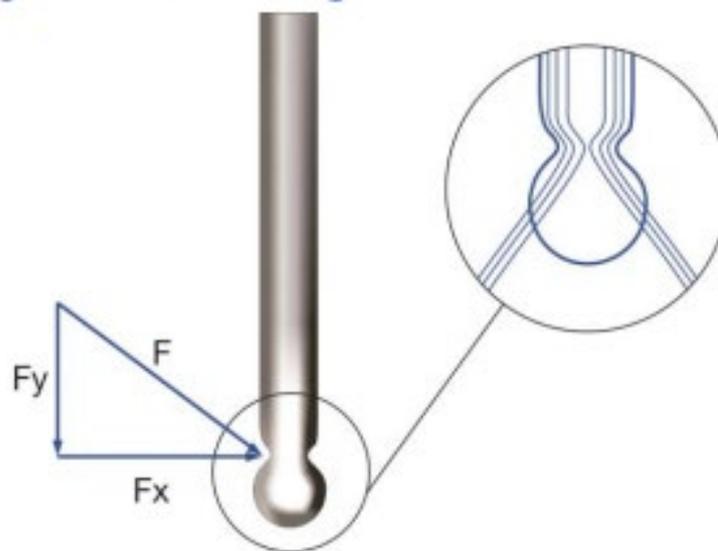
Figura 7 - Variação de f_2 em função do volume da gota



Fonte: [37]

A partir do exposto pode-se concluir que o raio do condutor afeta demasiadamente o valor da força eletromagnética, exercida sobre o condutor, a qual vai contribuir cada vez mais para a redução da seção transversal da gota, resultando no Efeito Pinch, ilustrado na Figura 8. Quanto maior a densidade de corrente no condutor, mais pronunciado é o efeito Pinch. A componente F_x , ilustrado na Figura 8, gera na gota uma pressão de origem eletromagnética, F_{em} , que age na direção do arco [28].

Figura 8 - Ilustração do Efeito Pinch



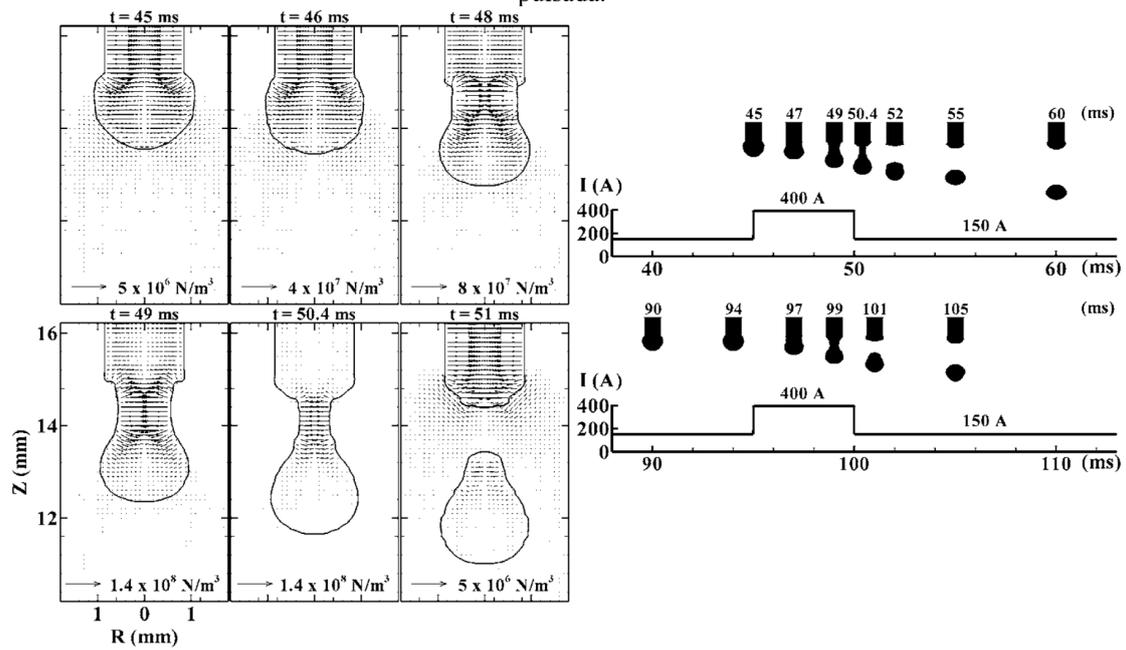
Fonte: [38]

Simulações computacionais têm ajudado no melhor entendimento deste fenômeno. Pode-se, a partir destas simulações, avaliar o comportamento dos vetores da P_{fem} , como também mensurar a corrente necessária para desprender uma gota de metal fundido dentro de um intervalo de tempo pré-determinado.

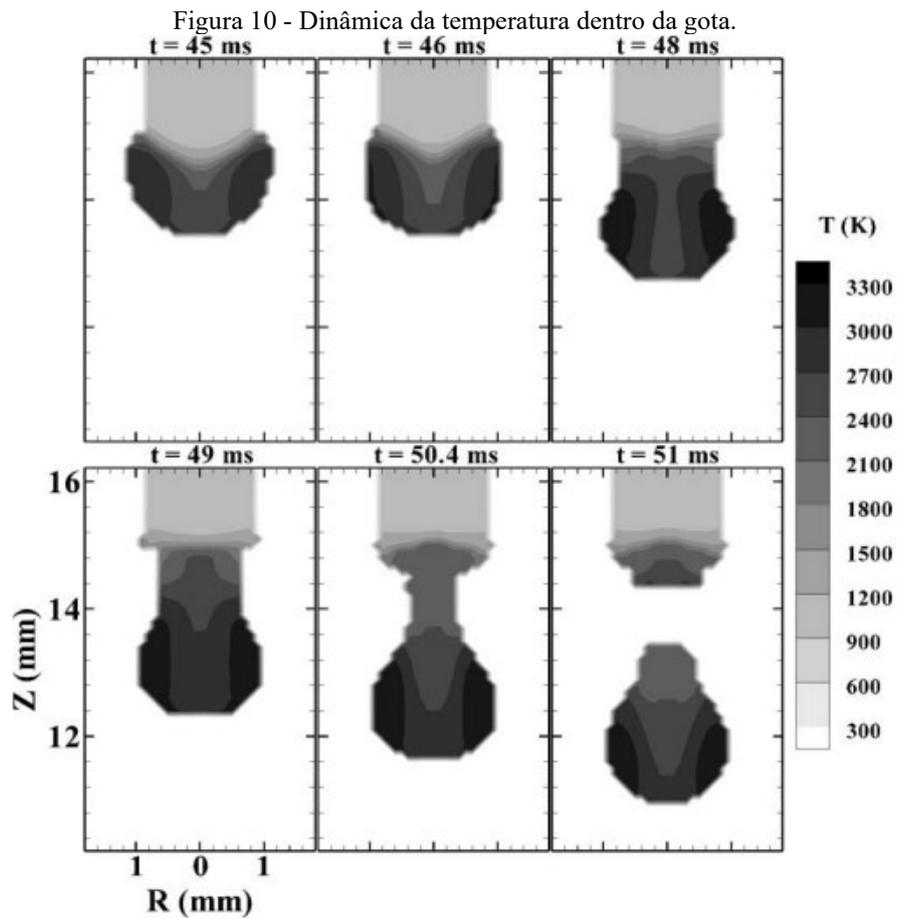
A Figura 9 apresenta a distribuição das forças eletromagnéticas no processo GMAW com corrente pulsada, simulado em um modelo computacional. Os parâmetros para o processo apresentado na Figura 9 são: material de base com 30 mm de diâmetro e 5 mm de espessura, arame de aço inoxidável de 1,6 mm, bocal de gás com diâmetro interno de 19,1 mm, vazão de gás a uma de 24 l/min, bico de contato com a mesma altura do bocal, comprimento do arco de 8 mm e DBCP de 25,4 mm, argônio como gás de processo, com velocidade de arame de 2,4 m/min e pulsos de corrente de 400 A enquanto manteve-se a corrente média de 175 A.

O diâmetro médio das gotas para esta simulação, apresentado na Figura 9 foi de 1,9 mm. Outro resultado encontrado na simulação é a dinâmica da temperatura dentro da gota enquanto se desprende, ilustrado na Figura 10. Comumente busca-se gotas com o diâmetro próximo ao valor do diâmetro do arame-eletrodo, pois apresenta maior estabilidade do arco e maior penetração do cordão [39]. É possível visualizar um resfriamento do interior da gota no tempo de 46 ms, o qual é reduzido até o momento 49 ms.

Figura 9 – Simulação da distribuição das forças eletromagnéticas no processo GMAW com corrente pulsada.



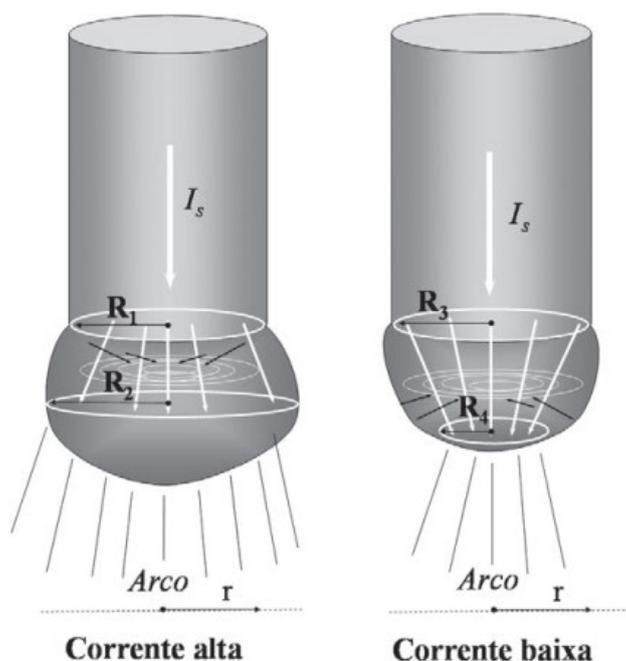
Fonte: [40]



Fonte: [40]

O acoplamento do arco na gota vai afetar a direção da F_{em} , quando o acoplamento do arco está na calota inferior da gota, estará presente uma componente de F_{em} em sentido contrário ao destacamento da gota, enquanto na situação a qual o arco está acoplado acima da calota inferior não existirá esta componente. Como destacado na Figura 11, quando a corrente é alta, há mais concentração de fluxo de corrente na região de cima da gota, onde o valor do raio R_2 é maior o que R_1 . Contudo, quando a corrente é baixa, há uma maior concentração de fluxo de corrente na parte inferior da gota, resultando em um valor de R_4 menor do que R_3 , Figura 11. O efeito da F_{em} , neste caso, empurraria o volume da gota contra o arame [34].

Figura 11 - Efeito do acoplamento do arco sobre a gota



Fonte: [34]

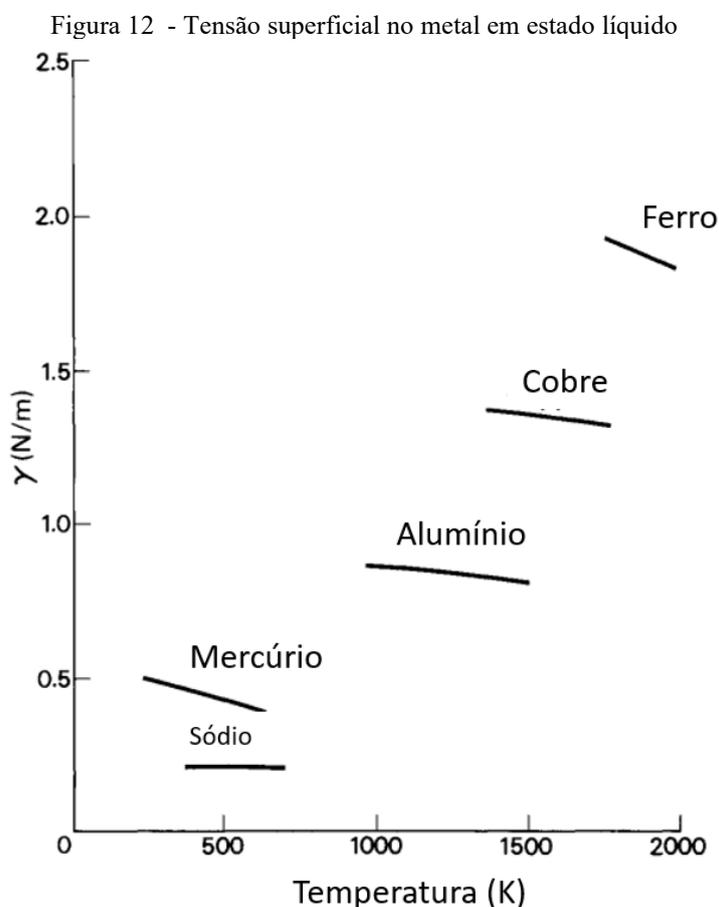
2.1.1.3 Força devido à tensão superficial do metal fundido

A força associada à tensão superficial está intimamente relacionada com o fato de que o material em estado líquido assume a geometria com superfície de menor área, de acordo com o seu volume. Sendo assim, a tensão superficial assume um papel de manter a gota no arame-eletrodo até o momento em que encosta na poça de fusão, representando uma força no sentido contrário ao destacamento da gota até o contato com

a poça. Outras forças devem auxiliar no destacamento da gota para superar a tensão superficial.

Após o contato da gota com a poça de fusão, a gota será transferida para a poça, onde F_γ atuará no sentido de destacamento da gota. Para calcular F_γ , utiliza-se o valor de π , o diâmetro da gota e a energia livre de superfície (γ), como na equação (4) [34]. A Figura 12 apresenta alguns exemplos de valores para a tensão superficial em diferentes temperaturas.

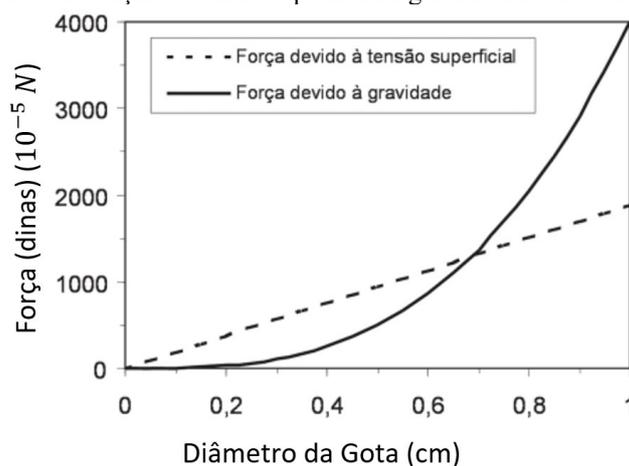
$$F_\gamma = \pi d_{gota} \gamma \quad (4)$$



Fonte: Adaptado de [41]

Como explicado anteriormente, em certas condições as forças F_γ e F_g , estão em direções opostas e possuem um parâmetro em comum, o diâmetro. A partir disso pode-se encontrar o Diâmetro Crítico, diâmetro máximo da gota, a qual consegue se manter no arame-eletrodo, como apresentado na Figura 13.

Figura 13 - Aumento das forças de tensão superficial e gravitacional devido ao diâmetro da gota



Fonte: [34]

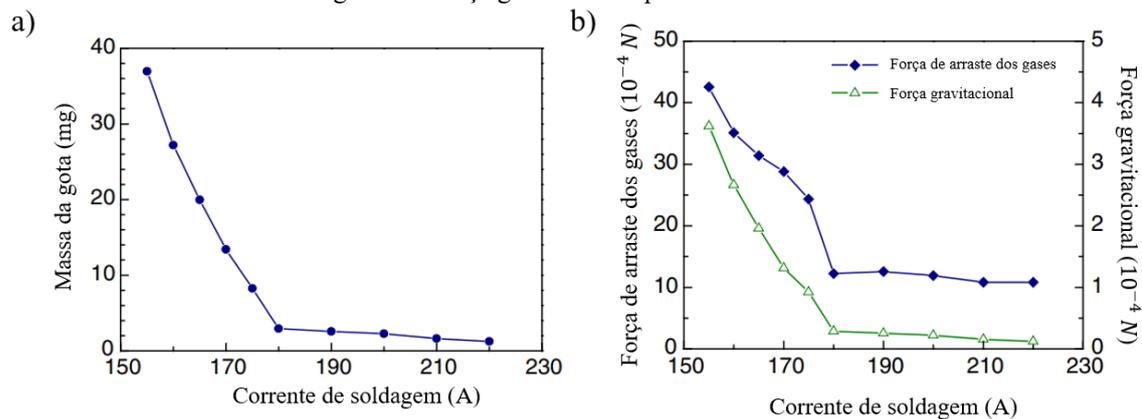
2.1.1.4 Força de arraste dos gases

A força de arraste dos gases (F_a) tem origem na força exercida pelo gás de processo na gota de metal. A F_a tem o seu valor inversamente proporcional ao valor da corrente, pois quanto maior a corrente menor é o volume das gotas formadas. Diante disto, a medida em que a massa da gota reduz a F_a também reduz, como ilustrado no item a) da Figura 14. Isso não reduz a importância da F_a para o processo, pois a magnitude da F_a pode atingir valores de aproximadamente 10 vezes maior do que a F_g , como mostra o item b) da Figura 14. No instante em que a gota é desprendida do arame-eletrodo, pode se formar um vórtex acima da gota, como ilustrado na Figura 15, gerando uma componente de força na direção contrária ao destacamento. Apesar disso, considera-se que o módulo da F_a atua no sentido de destacamento da gota.

A força de arrasto em uma esfera imersa em um fluido F_a , de acordo com a teoria da mecânica dos fluidos, pode ser calculada de acordo com a equação (5), onde utiliza-se o coeficiente de arrasto C_D (0,8 considerando as propriedades do arco elétrico) [42], o A_p se refere a área da gota projetada em um plano perpendicular ao escoamento do gás de processo, equação (6), que por sua vez é obtido utilizando como variável apenas o diâmetro da esfera (D). A densidade do gás de processo (ρ_f) é calculado a partir da equação (7), em que são utilizados o valor da pressão normal (P) ($1,01 \times 10^5 Pa$), a massa molar do gás (M), como por exemplo o argônio ($39,95 \times 10^{-3} kg/mol$), a constante universal dos gases (R_g) ($8,31 J/K mol$) e a temperatura do arco (T_a) em

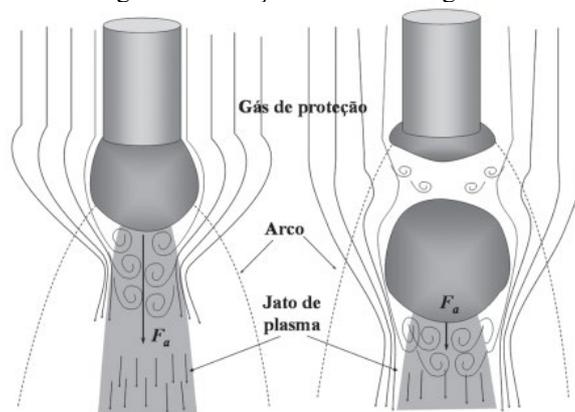
kelvin. A velocidade dos gases V_f , presente na equação (5) é calculada na equação 8 utilizando apenas o produto da constante (k) (0,75) e o valor da corrente de soldagem (I). [34]

Figura 14 - Resultados experimentais do processo GMAW com arame 1,2 mm, arame com polaridade positiva, DBCP de 14 mm, gás de processo argônio puro, velocidade de soldagem 0,6 m/min, material de base aço ao carbono com 6 mm. a) Variação da massa da gota pela corrente; b) A força de arraste dos gases e a força gravitacional pela corrente.



Fonte: [43]

Figura 15 - Força de arraste dos gases.



Fonte: [34]

$$F_a = C_D A_p \frac{\rho_f v_f^2}{2} \quad (5)$$

$$A_p = \pi \left(\frac{D}{2}\right)^2 \quad (6)$$

$$\rho_f = \frac{PM}{R_g T_a} \quad (7)$$

$$v_f = kI \quad (8)$$

2.1.1.5 Força de vaporização

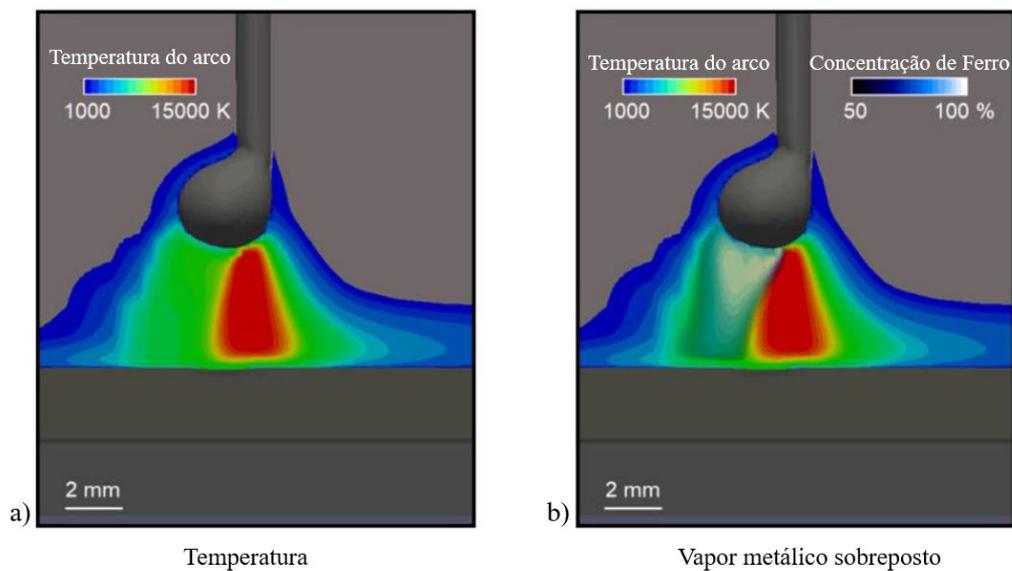
A força de vaporização está presente como uma força determinante no processo de transferência metálica nos modos de transferência globular. Autores como Ashby et al. [41], utilizam a equação de Clapeyron-Clausius para calcular o valor da força de vaporização (F_v), equação (9), onde é considerado o calor latente de evaporação por mol (L_E), a temperatura em kelvin (T), o volume molar do vapor (V_V) e o volume molar do líquido (V_L) [34]. Contudo trabalhos recentes utilizam modelos computacionais baseados nas equações de conservação de massa, momento radial e axial, corrente, Maxwell's e a lei de Ohm [44]. Apesar dos modelos computadorizados dos processos de soldagem serem de grande valia para o entendimento do processo, não somente a F_v , algumas condições de contorno são utilizadas para simplificar o modelo e permitir o processamento da simulação [45][46] [47][48][49].

$$\frac{\partial F_v}{\partial t} = \frac{L_E}{T(V_V - V_L)} \quad (9)$$

Responsável por atuar na direção contrária ao deslocamento da gota, a F_v também atua no resfriamento do arco. Uma simulação feita por Ogino et al. [50], apresentou redução da temperatura na região do arco com maior concentração de vapor metálico, Figura 16. A F_v tem o potencial de repelir a gota, como na Figura 17.

A presença de vapor metálico na região do arco elétrico torna essa área mais resistiva à passagem da corrente. Esta região ionizada continua sendo parte do arco elétrico e se mantém ionizado. Contudo, a perda de calor, por radiação, por parte do vapor metálico, resulta em uma menor condutividade elétrica desta região [51]. Consequentemente, a corrente tende a procurar um caminho com menos resistência.

Figura 16 - Distribuição da temperatura e do vapor metálico. a) Temperatura do arco, b) Vapor metálico sobreposto



Fonte: Adaptado de [50]

Figura 17 - Exemplo de gota repelida pelo vapor metálico.

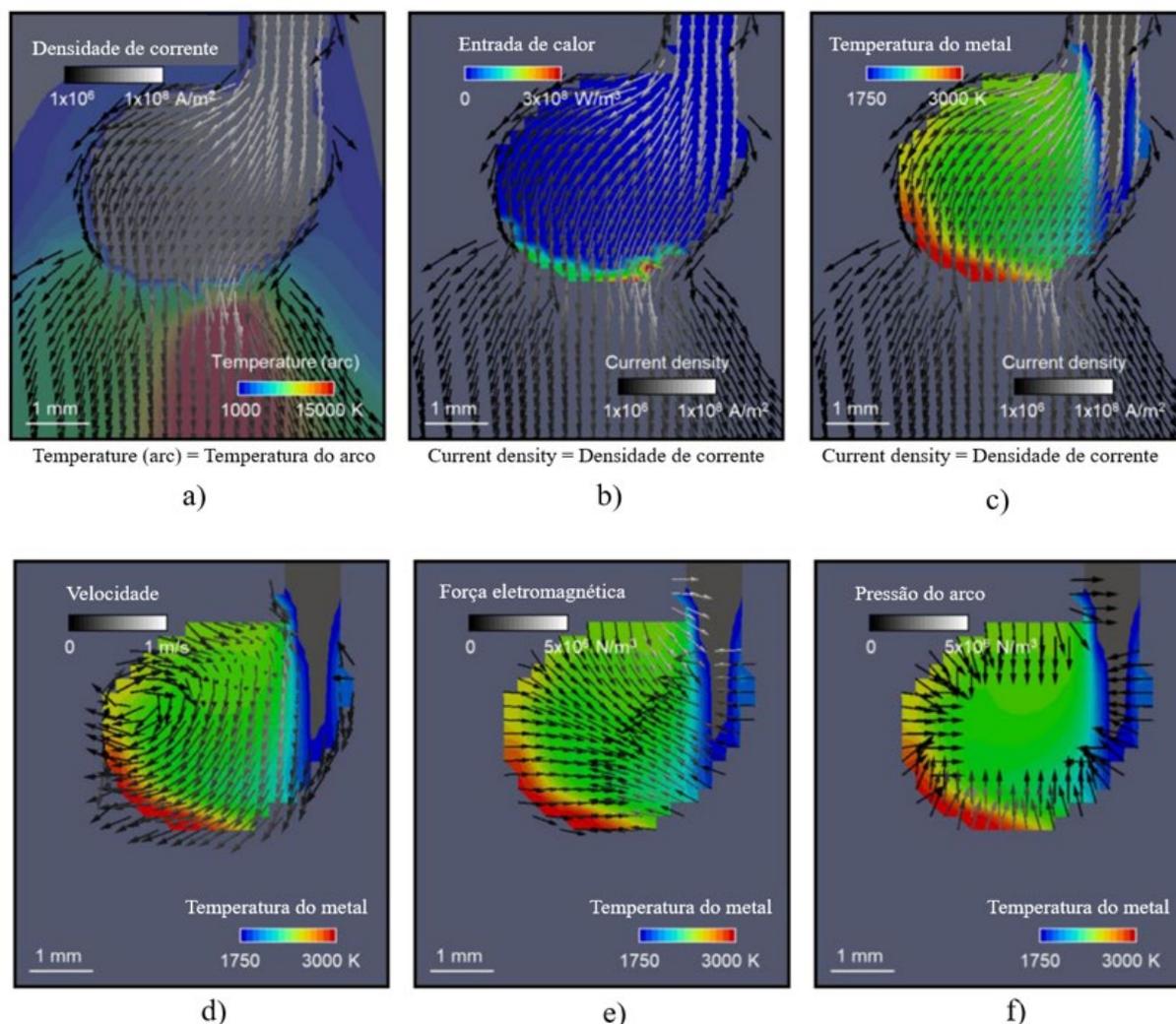


Fonte: LABSOLDA.

Ao analisar a região do arco próximo à gota, a corrente concentra-se na região da gota com menos vapor metálico, como mostra o item a) da Figura 18. Por consequência a região de maior entrada de calor na gota se localiza na região de maior saída de cargas da gota, ilustrado no item b) da Figura 18. Devido ao fluxo dentro da gota, item d) da

Figura 18, a região de maior temperatura dentro da gota é onde forma mais vapor metálico, item c) da Figura 18.

Figura 18 - Corrente, energia, velocidade e a direção da distribuição de forças em uma gota assimétrica. a) Densidade de corrente, b) Entrada de calor, c) Temperatura, d) Velocidade, e) Força eletromagnética, f) Pressão do arco

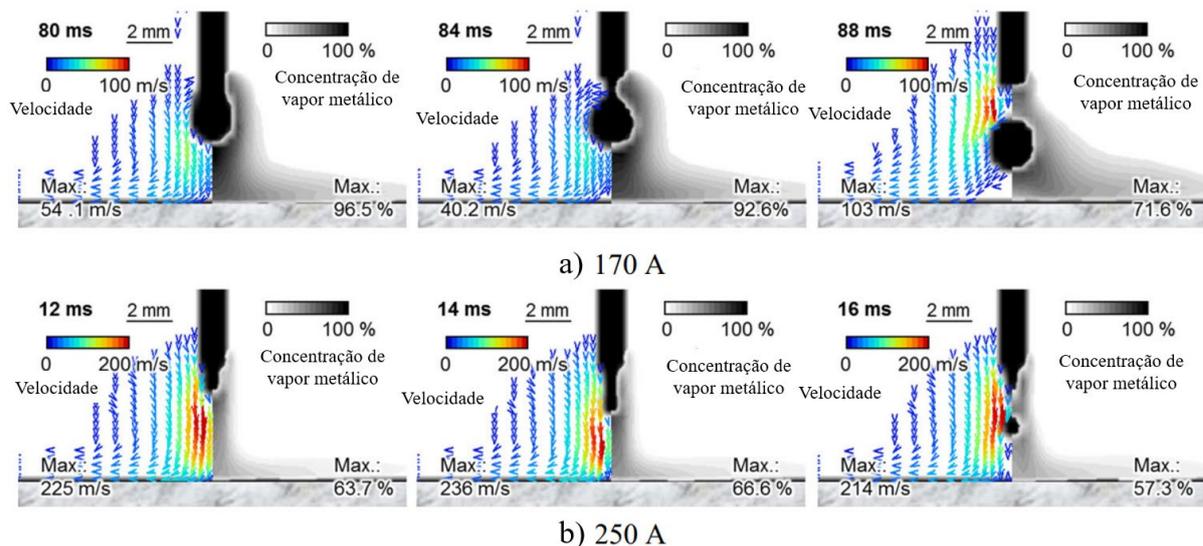


Fonte: Adaptado de [50]

A concentração de vapor metálico no arco para o destacamento goticular tende a estar em maior concentração na região inferior a gota e, após o destacamento da mesma, também na região superior da gota, como apresenta o trabalho de Ogino et al. [47], o qual simulou o processo GMAW sob o gás de processo argônio. A Figura 19 apresenta a situação descrita para duas condições, 170 A e 250 A, abaixo e acima da corrente de transição, respectivamente. É possível constatar o aumento da velocidade do vapor

metálico com o aumento da corrente, em resposta ao aumento da pressão devido ao campo eletromagnético.

Figura 19 - Cálculo de velocidade e concentração de vapor metálico distribuído no arco plasma a) 170 A, b) 250 A



Fonte: Adaptado de [47]

2.1.2 Força devida à dinâmica do arame

Algumas versões modernas do processo GMAW utilizam o controle eletromecânico do arame para aprimorar a transferência metálica. O software de controle da fonte de soldagem, nestas versões, sabe o momento da reabertura, pois é precedido pelo envio do comando de retroceder o arame-eletrodo. Caso seja mantido o valor da corrente, a F_{em} vai aumentar à medida que ocorre a estricção da ponte metálica. Nos casos em que a corrente empregada pela fonte de soldagem não seja reduzida, o primeiro resultado será a explosão da ponte metálica, seguido pela formação de respingos. Outro efeito muito prejudicial para o processo é a instabilidade da poça. A redução da corrente, combinada com o movimento de recuo do arame-eletrodo auxiliam o rompimento da ponte com limitada produção de respingos e mantém a estabilidade da poça de fusão.

O desenvolvimento dos processos que se utilizam do controle da dinâmica de arame vem ganhando popularidade a medida em que são utilizados em manufatura aditiva [52], revestimento em diferentes posições de soldagem [53] e até mesmo aplicações tradicionais, como o preenchimento de chanfro [54].

O movimento controlado do arame nos processos de soldagem com alimentação dinâmica adiciona um novo elemento na física da transferência metálica, a força devida à dinâmica do arame (F_{wd}). Esta nova e complexa força não é abordada pela tradicional teoria do equilíbrio de forças estáticas.

A alimentação dinâmica de arame revolucionou processos tradicionais de soldagem como o TIG [19], o laser [55] e o no processo GMAW [25]. Nas diferentes tecnologias, as quais são utilizadas para aplicar a tecnologia de alimentação dinâmica, o movimento do arame se distingue, dificultando uma explicação mais generalista dos efeitos da força devida à dinâmica do arame, devido as particularidades de cada tecnologia.

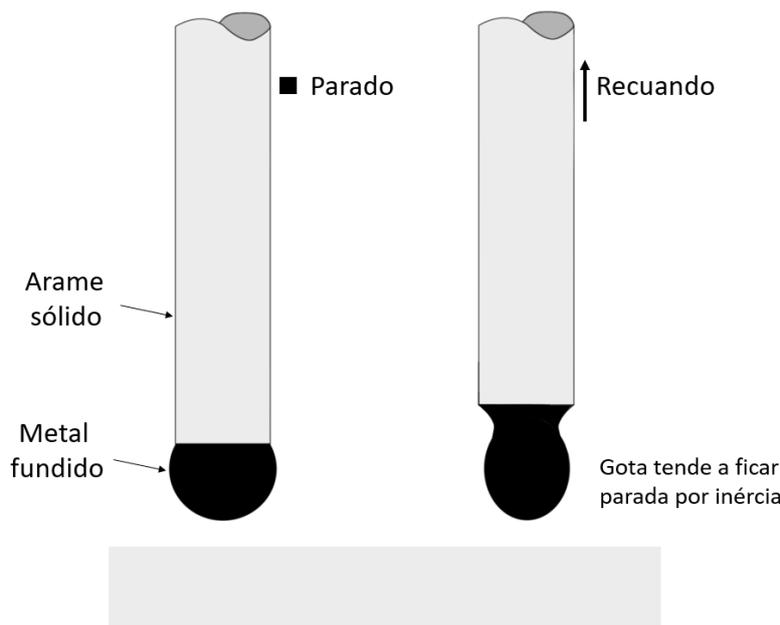
A relevância de F_{wd} nos processos, que serão apresentados a seguir é significativa, e confere a F_{wd} um papel importante na transferência metálica nestes processos modernos de soldagem. Apesar da distinção na direção de F_{wd} no processo MIG-AD quando comparado ao com versões onde o arame é submetido a um movimento rotacional, a origem em ambos os processos é a dinâmica do arame.

2.1.2.1 Força devido a dinâmica do arame (F_{wd}) no processo MIG-AD

A alimentação dinâmica do processo MIG-AD exige velocidades elevadas no movimento de avanço e recuo do arame, distinto dos processos de soldagem GMAW tradicionais, onde o arame avança em uma velocidade constante, apenas na direção da poça. A aceleração no movimento de recuo do arame, quando a gota está formada e suspensa, pode ser descrito como impulso. O impulso (I_{mp}), calculado a partir da força (F), equação (10) [34], adiciona um novo elemento na dinâmica do processo, a resistência da massa a uma variação de velocidade, inércia. A inercia por sua vez contribui para o destacamento da gota, como mostra Figura 20.

$$I_{mp} = \int F \partial t \quad (10)$$

Figura 20 - Contribuição da inércia para o destacamento da gota durante o recuo do arame.



Fonte: Autor.

Personagens como Aristóteles, Johannes Kepler, Galileu Galilei, René Descartes e Christiaan Huygens escreveram sobre a inércia, mas a lei da inércia, como a conhecemos hoje, foi escrita por Isaac Newton, em sua obra intitulada como *Princípios Matemáticos de Filosofia Natural, Principia*, e publicada em 1687 [56].

“corpus omne perseverare in statu suo quiescendi vel movendi uniformiter in directum, nisi quatenus illud a viribus impressis cogitur statum suum mutare.”

“todo corpo persiste em seu estado de repouso ou de movimento uniformemente retilíneo, exceto na medida em que é compelido pelas forças sobre ele a mudar de estado.”

(Issac Newton)

A tendência de um corpo em repouso permanecer em repouso ou permanecer no estado de movimento retilíneo uniforme, se estiver em movimento é a definição de inércia comumente utilizada em livros de física e descrita pela equação (11), segunda lei de Newton, onde a força resultante (\vec{F}) é igual ao produto da massa do corpo (m) e a aceleração (\vec{a}) [57].

$$\vec{F} = m \cdot \vec{a} \quad (11)$$

A equação (12) apresenta a aceleração (\vec{a}) em função da variação da velocidade ($\Delta\vec{v}$) dividida pela variação do tempo (Δt). Pode-se substituir a aceleração na equação (11) e chegamos à equação do teorema do impulso, equação (13), na qual tem-se que o impulso é igual a variação da quantidade de movimento, equação (14). Por sua vez a variação da quantidade de movimento ($\Delta\vec{Q}$) pode ser reescrita, como na equação (15), onde a variação da quantidade de movimento é igual a variação da quantidade de movimento final ($\overrightarrow{Q_{Final}}$) menos a inicial ($\overrightarrow{Q_{Inicial}}$). Substituindo os valores encontrados na equação (14) na equação (15), chega-se à equação 16), a qual relaciona a massa e a variação da velocidade inicial e final para encontrar o impulso [57].

$$\vec{a} = \frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t} \quad (12)$$

$$\vec{F} \cdot \Delta t = m \cdot \Delta\vec{v} \quad (13)$$

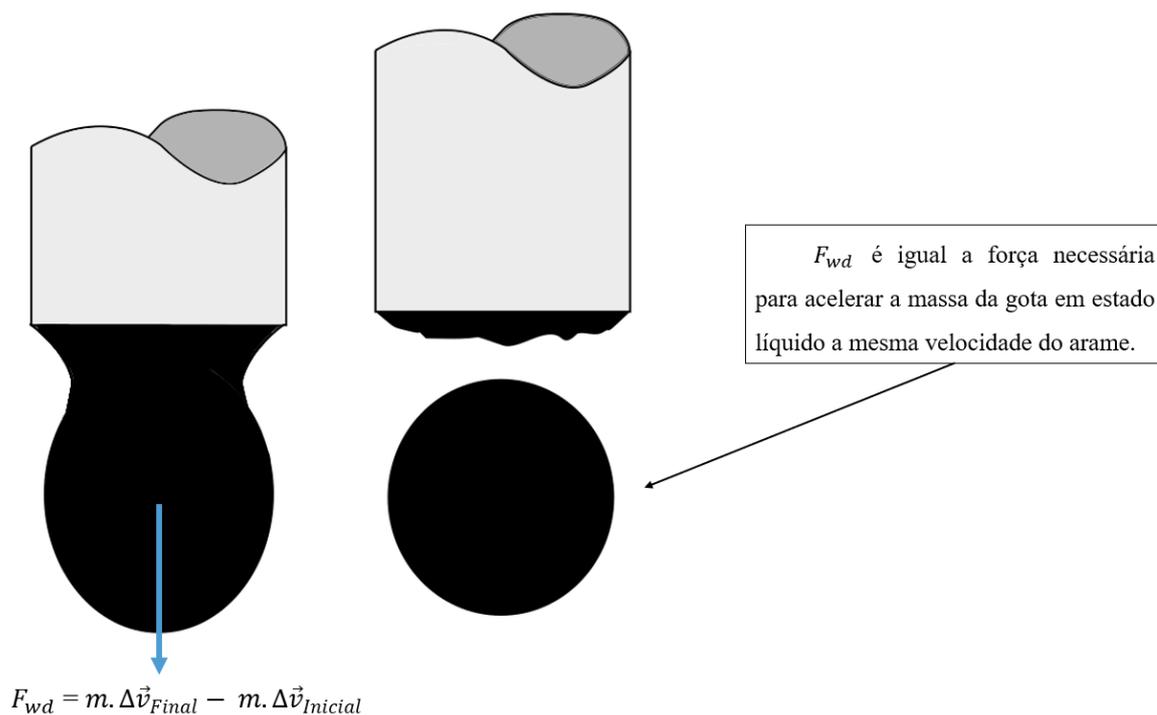
$$\overrightarrow{I_{mp}} = \Delta\vec{Q} \quad (14)$$

$$\Delta\vec{Q} = \overrightarrow{Q_{Final}} - \overrightarrow{Q_{Inicial}} \quad (15)$$

$$\overrightarrow{I_{mp}} = m \cdot \vec{v}_{Final} - m \cdot \vec{v}_{Inicial} \quad (16)$$

Por definição pode-se concluir que o valor da força devido a dinâmica do arame (F_{wd}), neste caso, é igual a força necessária para acelerar a massa da gota em estado líquido a mesma velocidade do arame, como ilustrado na Figura 21.

Figura 21 - Quantificação da força devida à dinâmica do arame no processo GMAW

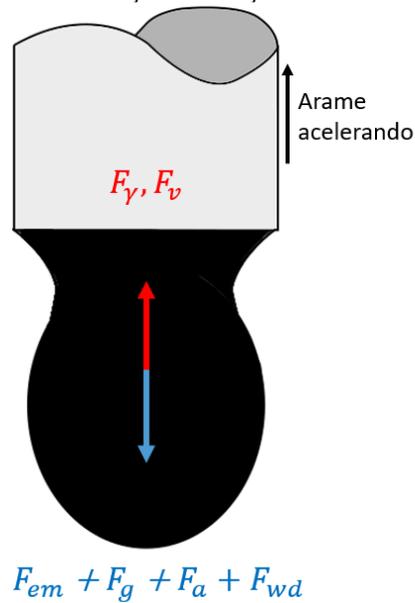


Fonte: Autor.

Todas as forças mencionadas em capítulos anteriores influenciam no valor total do deslocamento necessário para que a gota destaque totalmente, como ilustrado na Figura 22. A força resultante (F_r) será determinada pela soma vetorial das forças ($F_r = \Sigma F$), sendo que ΣF pode ser calculado pela equação de movimento, equação (17). Sendo assim, o somatório das forças é igual à massa (m) multiplicada pela aceleração do seu centro de massa (a_G). Com base nessa afirmação pode-se concluir que, para a gota ficar suspensa e sem se movimentar no sentido do recuo do arame, a aceleração do centro de massa deve ser igual a zero. Resolvendo a equação (17) com a a_G igual a zero, o resultado do somatório das forças (ΣF) também é igual a zero. Pode-se concluir que, para que a gota fique suspensa no ar, sem recuar junto do arame, é necessário respeitar a igualdade apresentada na equação (18). A utilização desta técnica será mais explorada no item [4.2](#) deste trabalho.

Figura 22 - Representação esquemática da ação das forças.

F_γ = Força devida a tensão superficial;
 F_v = Força de vaporização;
 F_{em} = Força de origem eletromagnética;
 F_g = Força da gravidade;
 F_a = Força de arraste dos gases;
 F_{wd} = Força devida a dinâmica do arame.



Fonte: Autor.

$$\Sigma F = m \cdot a_G \quad (17)$$

$$F_{em} + F_g + F_a + F_{wd} = F_\gamma + F_v \quad (18)$$

Apesar da F_{wd} não pertencer à teoria do equilíbrio de forças estáticas por não se tratar de uma força estática, mas sim dinâmica, o trabalho de [26] adicionou a F_{wd} no balanço de forças, como na Figura 22, para criar um modelo computacional.

Para que o fenômeno principal do destacamento da gota seja a F_{wd} , o deslocamento total no recuo do arame deve garantir o destacamento da gota.

2.1.2.2 Força devido a dinâmica do arame (F_{wd}) no CMT

Fortemente representado pela fonte de soldagem CMT da empresa Fronius, as fontes de soldagem com a tecnologia de alimentação dinâmica do arame-eletrodo estão no foco da indústria WAAM [58]. O controle eletrodinâmico do movimento do arame permite uma sincronização da onda de corrente com o movimento do arame, tornando este processo muito atrativo na aplicação de revestimento [59] [60]. A união de juntas

dissimilares é uma aplicação que utiliza a característica do baixo aporte térmico para a soldagem de união de materiais com distintos pontos de fusão, como por exemplo o aço revestido de zinco e alumínio forjado [61], o alumínio e aço galvanizado [62][63], comum na indústria automobilística [64], aço inoxidável e Titanium com arame de cobre [65] e o alumínio e Titanium [66]. É possível fazer a união de juntas dissimilares com outros processos de soldagem, contudo, a utilização do processo GMAW DF garante melhores propriedades mecânicas a peça [67]. Além disso, o controle da onda de corrente sincronizado com o movimento resulta em um processo virtualmente livre de respingos.

No processo GMAW DF o movimento do arame é feito por um servomotor, garantindo que correções podem ser feitas enquanto a solda está ocorrendo para manter a repetibilidade da deposição das gotas. O movimento dinâmico pode corrigir até mesmo alterações repentinas da altura do bico de contato com a peça (DBCP). Com o objetivo de avaliar o comportamento do movimento do arame e mostrar como o CMT responde a mudanças abruptas de DBCP, foi feito um ensaio onde foi depositado um cordão sobre duas chapas sobrepostas, causando uma mudança repentina de altura do arco. Um vídeo filmado por uma câmera de alta velocidade está disponível no link do QRCode da Figura 23, mostrando o momento exato em que o arame avança sobre a descontinuidade da chapa base. É possível ver que o arame avança a uma velocidade até uma certa altura e depois continua avançando em uma velocidade menor até efetuar o curto-circuito, depositando a gota. Isso mostra como a dinâmica do arame auxilia no processo de soldagem GMAW DF.

Figura 23 - Link para vídeo de ensaio com alteração de DBCP.

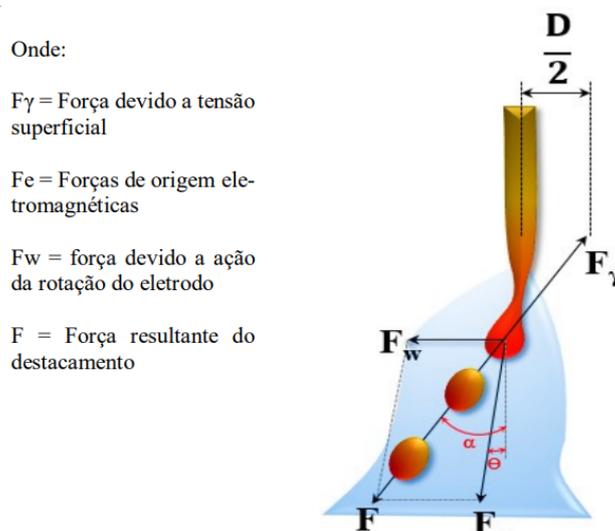


Fonte: Autor.

2.1.2.3 F_{wd} na rotação do arame-eletrodo.

O sentido da F_{wd} pode mudar de acordo com os movimentos executados pelo arame, como mostra a Figura 24, a qual ilustra as principais forças envolvidas na transferência metálica nas versões que realizam a rotação do arame-eletrodo. A Figura 25 mostra uma imagem da tocha do SpinArc, onde o arame está rotacionando em alta frequência. O objetivo da rotação do arame é promover uma melhor fusão das faces do chanfro, eliminando problemas de falta de fusão em caso com abertura estreita (*narrow gap*).

Figura 24 - Representação esquemática da ação da força centrífuga no destacamento da gota.



Fonte: [68]

Figura 25 - Tocha do SpinArc.



Fonte: [68]

O processo SpinArc se apresenta como um processo promissor para aplicações na indústria automotiva, na construção, em tubulação de petróleo e gás entre outras, contudo, ainda são poucos os estudos que apresentam a sua utilização com diferentes gases de processo, diâmetro de eletrodo e velocidades de soldagem [69].

A soldagem com arco rotativo permite a criação de juntas profundas e estreitas, ou sulcos estreitos, graças à fusão aprimorada ao longo das paredes laterais. Essa característica é frequentemente empregada na construção de plataformas offshore e oleodutos. Alguns defeitos, como a falta de fusão, podem ser resolvidos mudando a direção de rotação, reposicionando a tocha de soldagem e removendo a escória quando aplicada em camadas para preencher um sulco [70]. Com o aumento da rotação do arame, pode-se observar uma redução na penetração do cordão, o que é desejável em aplicações de revestimento [71].

2.1.2.4 F_{wd} na vibração do arame-eletrodo

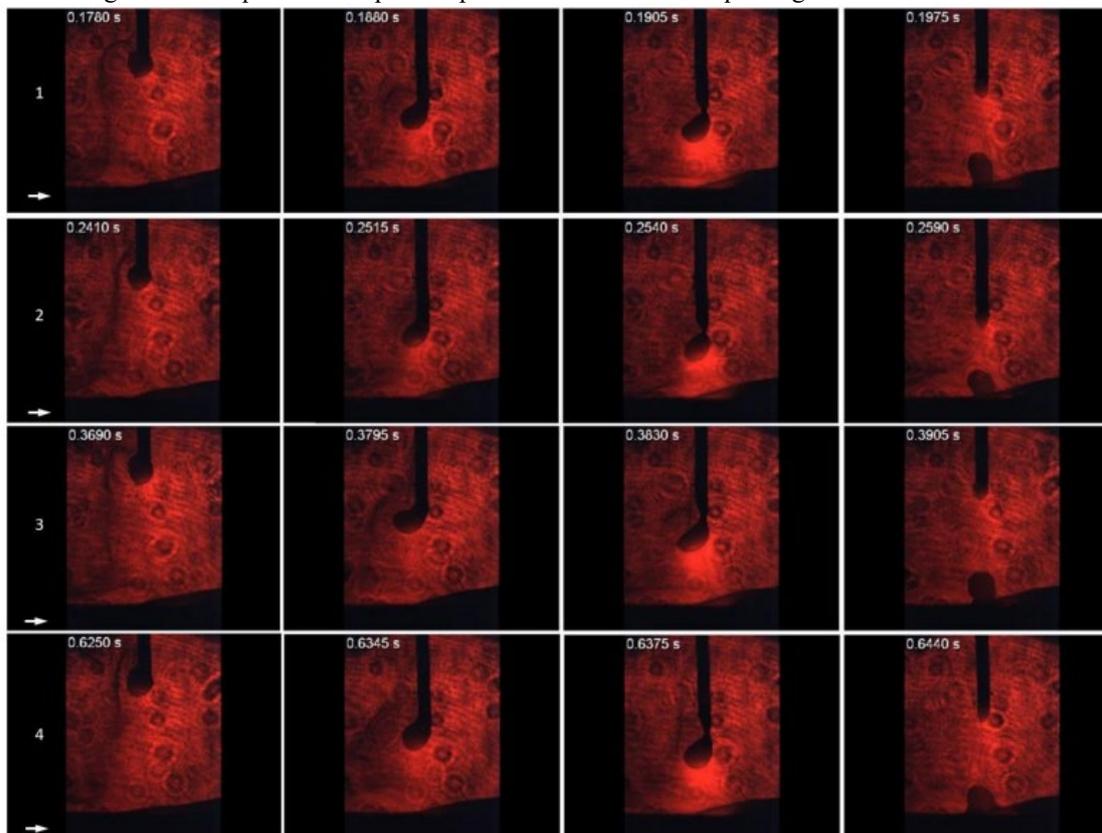
A vibração do eletrodo tem como objetivo atingir uma frequência de oscilação que fique dentro da faixa de ressonância da gota pendente, auxiliando no desprendimento da gota. Objetivando a soldagem de chapas finas, nas quais é necessário a redução do aporte de calor na peça a ser soldada, este processo permite o destacamento das gotas por voo livre sem o uso de pulsos de corrente ou da utilização de uma corrente média acima da corrente de transição. O trabalho desenvolvido por Zhang et al. [72] apresentou um sistema mecânico de vibração do eletrodo para movimentar o arame para cima e para baixo com frequências na ordem de 60 Hz, Figura 26. Quadros de uma filmagem de alta velocidade são apresentados na Figura 27. O autor apresenta a propriedade de inércia da gota como uma força, a qual tem a mesma direção e dois sentidos, a depender se o arame está recuando ou avançando.

Como já mencionado anteriormente a F_{wd} não se encaixa no modelo matemático da teoria das forças estáticas e nem no modelo da teoria Pinch, sendo assim o trabalho desenvolvido por J. H. Choi et al. [26] propôs o modelo do balanço de forças dinâmicas, para um sistema de vibração de arame. O modelo proposto foi uma extensão da teoria de forças estáticas, apenas adicionando a F_{wd} , que em seu trabalho foi chamado de força da inércia.

2.1.2.5 F_{wd} na pulsação do arame-eletrodo

O trabalho de Jorge [73] desenvolveu um sistema proprietário, similar ao da Figura 26. Diferente do trabalho de Zhang et al.[72] nomeou a técnica como pulsação de arame-eletrodo e a força adicional resultante do movimento do arame como força de impulso, tratada como F_{wd} por este trabalho. A grande diferença entre os trabalhos é a frequência oscilação, sendo que neste trabalho atingem-se frequências de 8 a 16 Hz, com uma corrente média de aproximadamente 150 A. Os resultados mostraram que a F_{wd} foi, dentro das condições de operação utilizados no trabalho, agente determinante para o destacamento da gota, como mostra a Figura 28.

Figura 28 - Sequências de quadros para o destacamento de quatro gotas no teste 16 Hz-UC



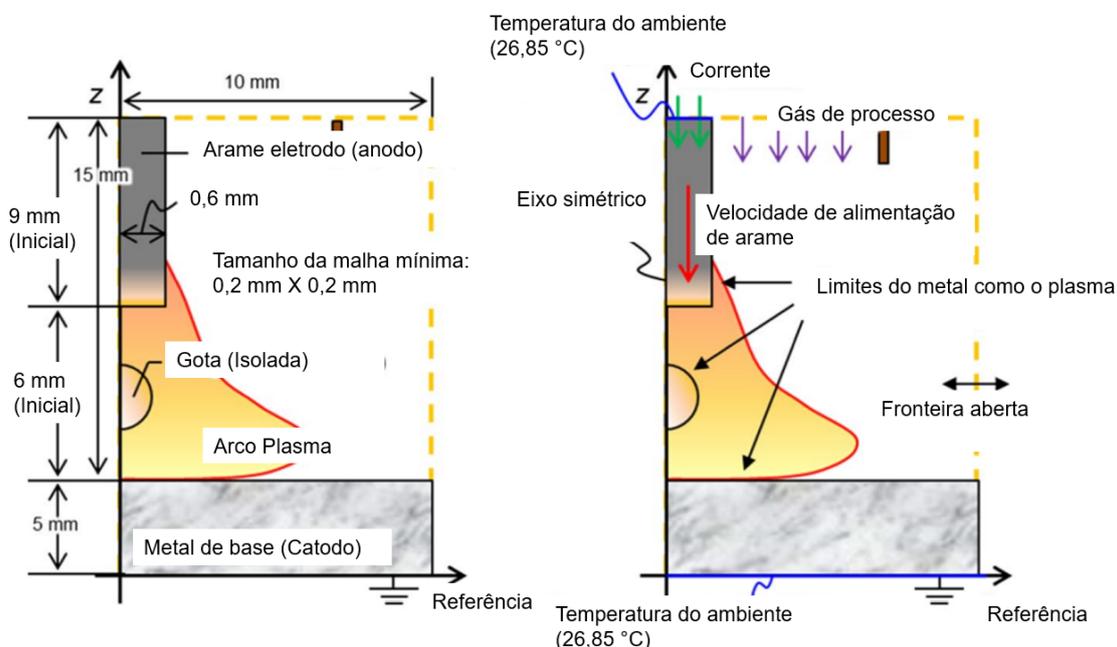
Fonte: [73]

As frequências de pulsação do arame que permitiram o destacamento de uma gota por pulso foram 8 Hz e 16 Hz, enquanto para frequências menores de 8 Hz e maiores do que 16 Hz não ocorre o destacamento de uma gota por pulso do arame, devido ao volume de material fundido na ponta do arame-eletrodo. O tipo de destacamento constatado foi o globular repulsivo.

2.1.3 Corrente de Transição

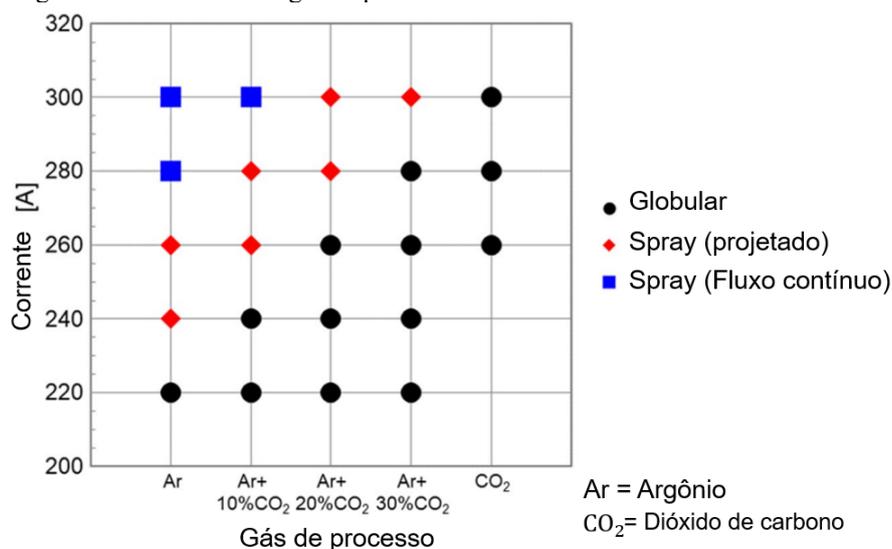
As condições da transferência metálica são incessantemente remodeladas, sobretudo quando consideramos a energia que percorre o circuito composto pelo arame-eletrodo, arco elétrico e o metal de base. Ao atingir um maior nível de corrente, o processo de transferência metálica globular passa a ser a transferência spray, como ilustrado na Figura 3, respeitando a tensão mínima para não atingir a transferência por curto-circuito. O gás de processo influencia no nível de corrente necessário para ocorrer essa transição, como pode-se constatar no trabalho de Y. Ogino et al. [27], no qual simulou o processo GMAW com as condições descritas na Figura 29, para um arame de aço ao carbono. A velocidade de alimentação foi alterada ao longo dos testes para manter as condições inicialmente propostas. O resultado foi um levantamento do tipo de transferência obtido com diferentes misturas de dióxido de carbono e argônio, Figura 30. É correto afirmar que o gás de processo altera o valor da corrente de transição, como também a composição do material de adição e seu diâmetro. A Tabela 1 apresenta as equações para chegar ao valor da corrente de transição.

Figura 29 - Diagrama esquemático (esquerda) e condições de contorno (direita) do modelo de soldagem



Fonte: Adaptado de [27]

Figura 30 - Influência do gás de processo e da corrente no modo de transferência



Fonte: Adaptado de [27]

Tabela 1 - Corrente de transição para o processo GMAW, em função do gás de proteção, material e diâmetro do arame

| Material do Arame | Gás de Proteção | Corrente Crítica-Ic (A) |
|-------------------------------|----------------------------|-------------------------|
| Aços ao Carbono e Baixa Liga | Argônio+2%O ₂ | 151xD+156 |
| | Argônio+5%CO ₂ | 139xD+41 |
| | Argônio+18%CO ₂ | 218xD+26 |
| Aços Inoxidáveis Austeníticos | Argônio+1%O ₂ | 164xD+24 |
| Cobre Desoxidado | Argônio | 186xD+15 |
| Bronze de Silício | Argônio | 150xD+32 |
| Alumínio 1100 | Argônio | 51xD+59 |
| Alumínio 5183 | Argônio | 59xD+88 |

Onde:

D = Diâmetro do arame-eletrodo

Fonte: [74]

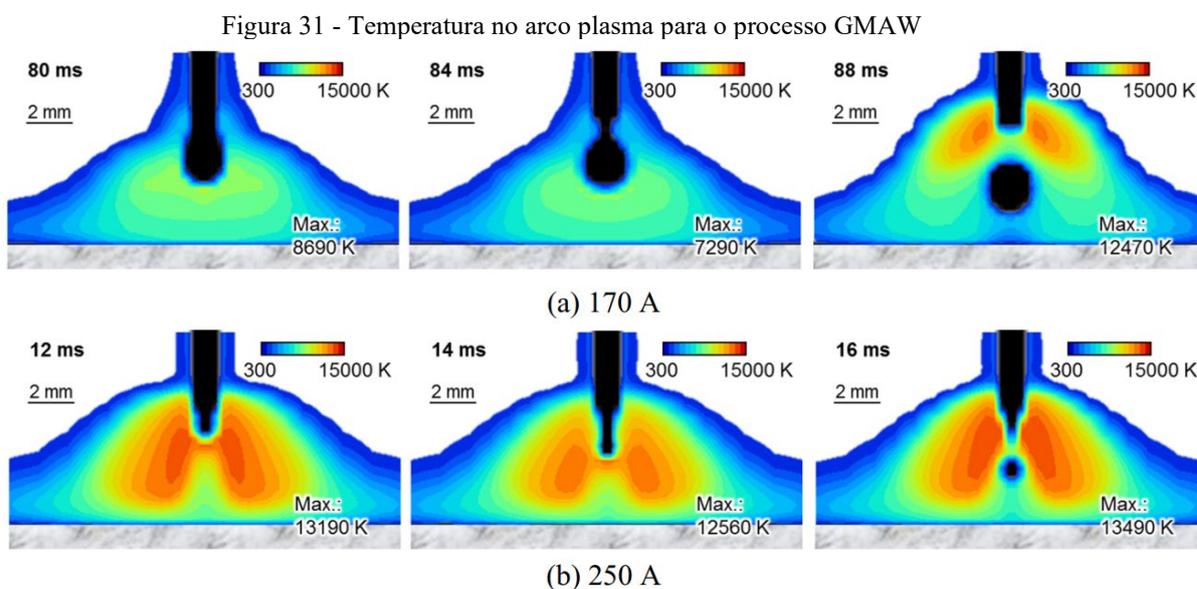
2.1.4 Influência da gota na termodinâmica do arco elétrico no processo GMAW

A compreensão do arco elétrico, quando dentro do contexto da soldagem, por muitas vezes, atribui uma versão simplista a uma área que, para uma compreensão mais profunda, exige uma infinidade de conhecimento no campo da física e da química. Somente assim é possível atingir a plena compreensão das ações e reações dos elementos presentes no arco elétrico, dado sua complexidade.

As características do arco elétrico são sobretudo dinâmicas no processo GMAW, devido à natureza do processo, o qual utiliza o arame, material de adição, como

eletrodo. As condições do processo mudam seriamente de acordo com o modo de transferência metálica adotado. O destacamento de material do arame-eletrodo por voo livre adiciona um novo elemento no processo, a gota, que por sua vez altera as condições do arco.

Na busca de entender os fenômenos físicos envolvidos no arco elétrico, muitos trabalhos simulam o processo dentro de uma série de condições de contorno, visto que a natureza da interação das partículas é afetada pelas altas temperaturas no arco podendo modificar substancialmente o valor dos coeficientes de transporte [41]. Na simulação apresentada na Figura 31, é possível constatar que a densidade de corrente determina a região de maior temperatura do arco. Avaliando o item a e b da Figura 31 pode-se afirmar que a gota cria resistência para a passagem da corrente no arco, alterando o fluxo da corrente e por consequência da temperatura no arco. Não somente a gota mas o vapor metálico presente em torno da gota, como apresentado na Figura 19, também criam resistência, reduzindo o fluxo de calor para o material de base [75].



Fonte: [47]

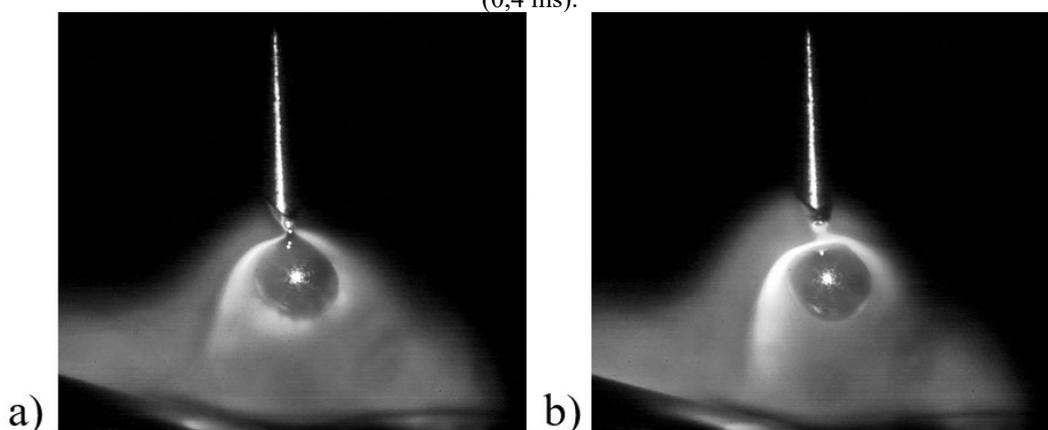
A temperatura na região inferior da gota, no instante 88 ms do item a) da Figura 31, é consideravelmente menor do que na região acima da gota. A alteração no arco não se restringe apenas à temperatura, mas também ao formato, o qual tem a geometria da região superior com maior diâmetro quando comparada ao instante anterior no qual a gota não havia desprendido, algo também constatado em filmagens de alta velocidade, Figura

32. Com base nestes dados, a hipótese que o autor deste trabalho apresenta é de que o fenômeno constatado corrobora para uma maior taxa de fusão do arame e uma redução no superaquecimento da gota.

O trabalho de Schnick et al. [75] fornece as características de temperatura no arco para diferentes níveis de corrente, mas diferente do que foi apresentado na Figura 31, a gota não está em curso em direção ao material de base. A comparação da Figura 33 com a Figura 31 reforça a afirmação de que existem alterações no arco quando a gota está em direção a poça, pois a gota e o vapor metálico criam resistência para a passagem da corrente, reduzindo a densidade de corrente, por consequência reduzindo a temperatura.

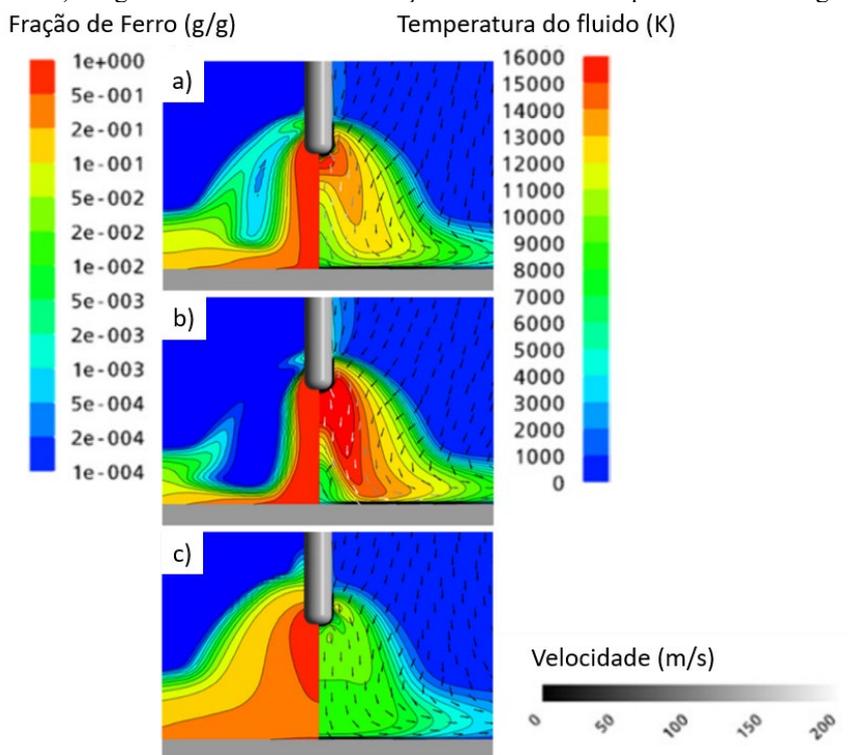
Foi possível constatar até este ponto da leitura que a gota, em voo livre, funciona como um resistor em um circuito eletrônico no processo de soldagem GMAW, pois ela se apresenta como um elemento resistivo à passagem de corrente no arco elétrico. O que não foi explicado até então foi o motivo pelo qual uma gota já desprendida do arame-eletrodo, ambos com um diâmetro similar, sob um arco elétrico, com temperaturas muito superiores a temperatura de ebulição do metal, permanece no estado líquido. Esse fenômeno assemelha-se ao efeito de Leidenfrost, publicado no manuscrito “De Aquae Communis Nonnullis Qualitatibus Tractatus” (1756), fenômeno observado na superfície de um líquido em contato com uma massa com temperatura muito superior, formando-se então uma camada isolante de vapor.

Figura 32 - Efeito da gota em queda livre sobre a geometria do arco no processo MIG/MAG em modo de controle em tensão. Gás de proteção argônio e material de adição aço ao carbono. a) Geometria do arco momento antes do desprendimento da gota (0 ms), b) Geometria do arco após o desprendimento da gota (0,4 ms).



Fonte: Autor[76].

Figura 33 - Fração de vapor de ferro (esquerda) e temperatura (direita) e velocidade de fluxo (vetores) em para (a) 250 A, (b) 400 A e (c) 100 A, com um fluxo de entrada de vapor de ferro na ponta do arame-eletrodo (ânodo). Região considerada na simulação 15 mm de altura por 10 mm de largura.

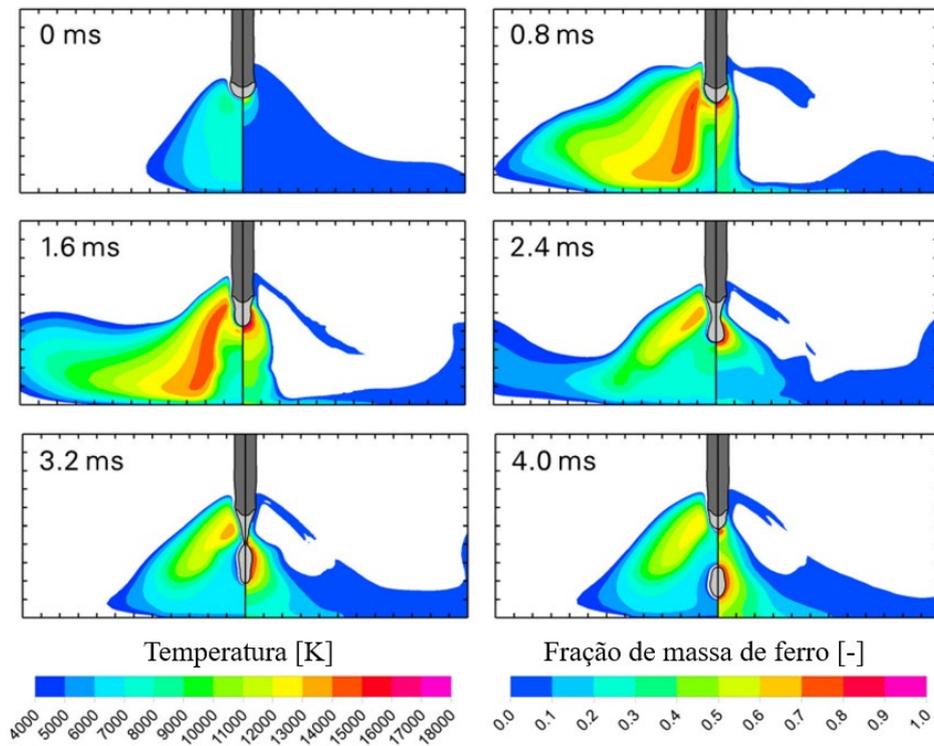


Fonte: Adaptado de [75]

Simulações apontaram que a porcentagem de metal no vapor metálico na camada isolante em torno da gota é superior a 80% [48], limitando a entrada de calor na gota, efeito Leidenfrost [77]. Esta camada isolante de vapor metálico também impede a transferência do calor interno da gota para o externo. Portanto o resfriamento acontece a uma taxa menor do que o previsto pela taxa de Langmuir, conceito que descreve a velocidade de evaporação de um líquido ou sólido no vácuo, permitindo o sobreaquecimento da gota [78]. A acelerada elevação de vapor metálico nas extremidades do material fundido, antes de se desprender do arame-eletrodo, deve-se ao aquecimento da superfície pelos elétrons absorvidos. A Figura 34 ilustra, nos momentos 3,2 e 4 ms, a redução da temperatura no entorno da gota que está em trajetória com a poça, reafirmando a constatação de que existe uma redução na taxa de absorção de calor enquanto a gota destacada e se destina para o material de base.

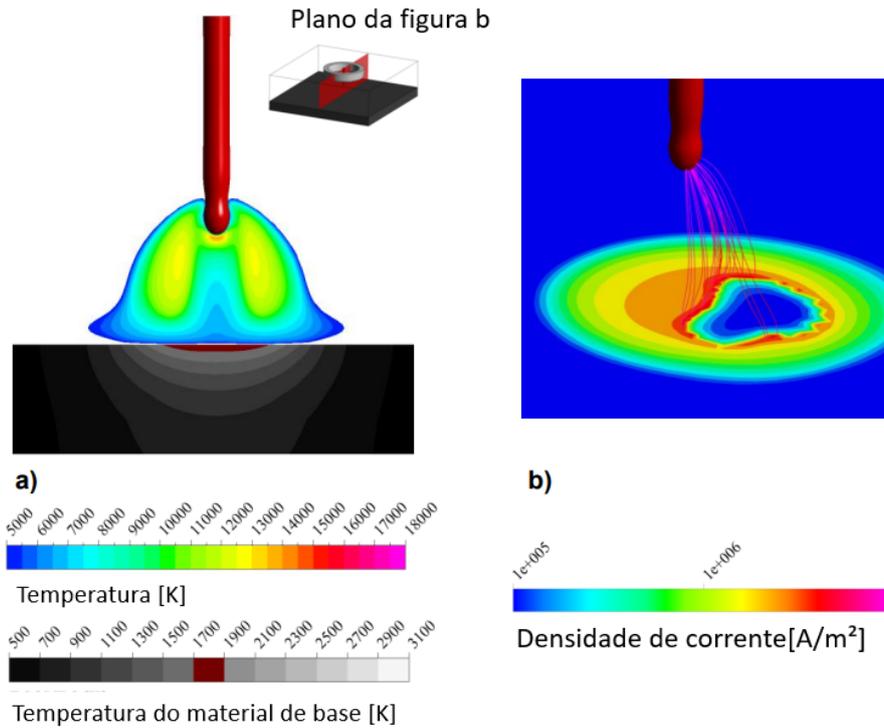
A partir da Figura 34, no momento 0,8 ms percebe-se que a zona de maior temperatura não está exatamente no centro da figura, devido aos pontos de emissão de corrente na poça, os quais buscam regiões da poça cuja superfície tenha mais oxido, como mostra a Figura 35. O item b da Figura 35 apresenta a distribuição da densidade de corrente na superfície do material de base, simulando apenas metade do arco.

Figura 34 - Cálculo da distribuição de temperatura (esquerda) e fração da massa de ferro (direita) para um ciclo do processo GMAW pulsado.



Fonte: Adaptado de [48]

Figura 35 - Distribuição de temperatura calculada do arco e da peça de trabalho no plano normal à direção de soldagem (a) e distribuição de densidade de corrente na superfície da peça de trabalho (b) para um arco de 250 A com uma taxa de vaporização de arame de 1.



Fonte: Adaptado de [48]

2.1.5 Transferência metálica por curto-circuito

Como apresentado em tópicos anteriores deste trabalho existem diferentes forças envolvidas na transferência metálica, as quais podem resultar no destacamento da gota. Contudo, o efeito do não destacamento da gota no processo GMAW convencional, o qual mantém a velocidade de alimentação de arame constante, resulta no contato do arame-eletrodo com a poça, conseqüentemente extinguindo o arco elétrico.

Usualmente conhecida como transferência metálica por curto-circuito a transferência do metal do arame-eletrodo para a poça de fusão por ponte metálica surge devido à tecnologia empregada nas primeiras fontes, antes do emprego de transistores de potência.

As primeiras fontes de soldagem do processo GMAW são basicamente transformadores-retificadores que reduzem a tensão de entrada, disponibilizando altos níveis de corrente ao processo. Utilizando a lei de Ohm conclui-se que quando o arame se encontra com a poça, causa o curto-circuito, o nível de corrente tende a subir até o limite disponível pela fonte. A velocidade com que a corrente é elevada depende da impedância da fonte, quanto maior a impedância da fonte mais lenta é a elevação da corrente. O súbito aumento da corrente aquece o arame-eletrodo por efeito joule e com auxílio do efeito Pinch ocorre o destacamento de material proporcionando as condições para a reabertura do arco elétrico, como já ilustrado na Figura 1. O complexo funcionamento do arco elétrico permite a operação de soldagem, contudo provoca fumos e respingos, devido às reações químicas (ex: combustão) envolvidas no momento do rompimento da ponte metálica. A Tabela 2 apresenta os níveis de corrente tipicamente atingidos no processo GMAW durante uma transferência por curto-circuito.

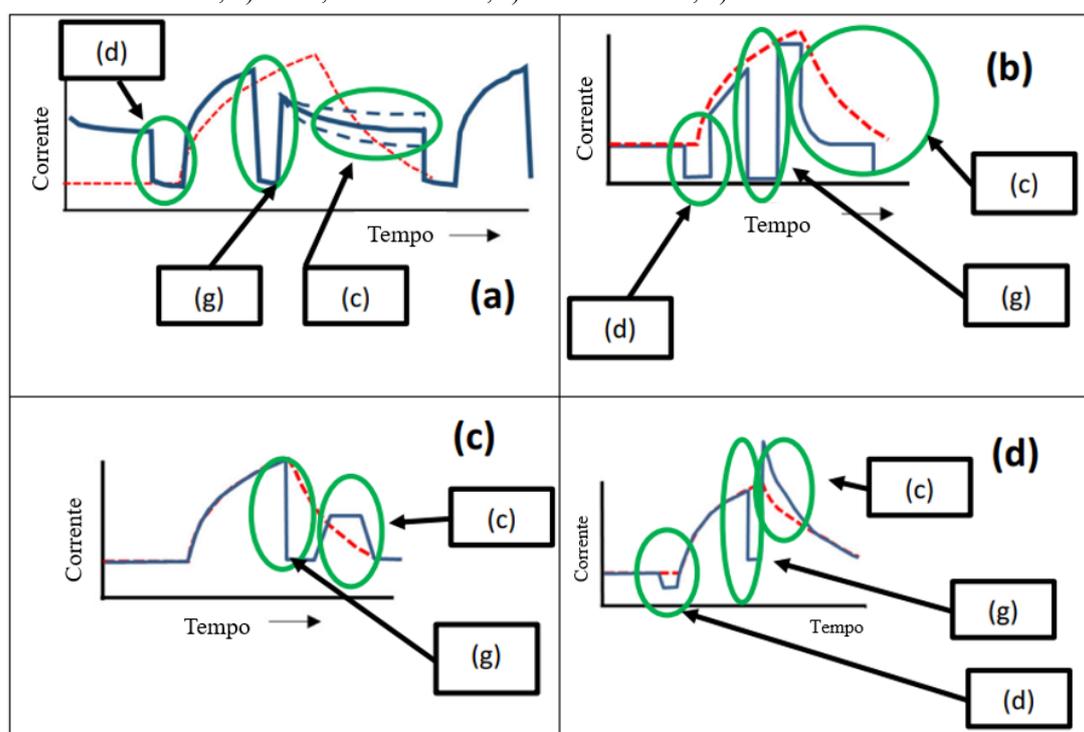
Tabela 2 - Correntes típicas de curto-circuito requeridas para a transferência de metal

| Tipo de arame | Diâmetro do Arame | | Corrente de curto-circuito (A) |
|---------------|-------------------|------|--------------------------------|
| | pol (") | mm | |
| Aço Carbono | 0,030 | 0,76 | 300 |
| | 0,035 | 0,89 | 320 |
| | 0,045 | 1,10 | 370 |
| | 0,052 | 1,30 | 395 |
| | 0,062 | 1,60 | 430 |
| Alumínio | 0,030 | 0,76 | 175 |
| | 0,035 | 0,89 | 195 |
| | 0,045 | 1,10 | 225 |
| | 0,062 | 1,60 | 290 |

Fonte: [79]

Após a implementação de transistores de potência em fontes de soldagem GMAW, foi possível controlar a elevação da corrente no momento do curto-circuito. Assim foi possível criar rotinas para identificar o momento do rompimento da ponte metálica e reduzir a potência antes que ocorra de fato o rompimento, reduzindo a emissão de respingos e fumos, técnica utilizada nas tecnologias Dakein CBT [80], Stava, Lincoln STT [81], EWM ColdArc e o SP control Tawers, todos representados na Figura 36.

Figura 36 - Exemplos de formas de ondas de corrente projetadas para curto-circuito controlado. a) Dahein CBT; b) Stava, Lincoln STT; c) EWM ColdArc; d) SP control Tawers.



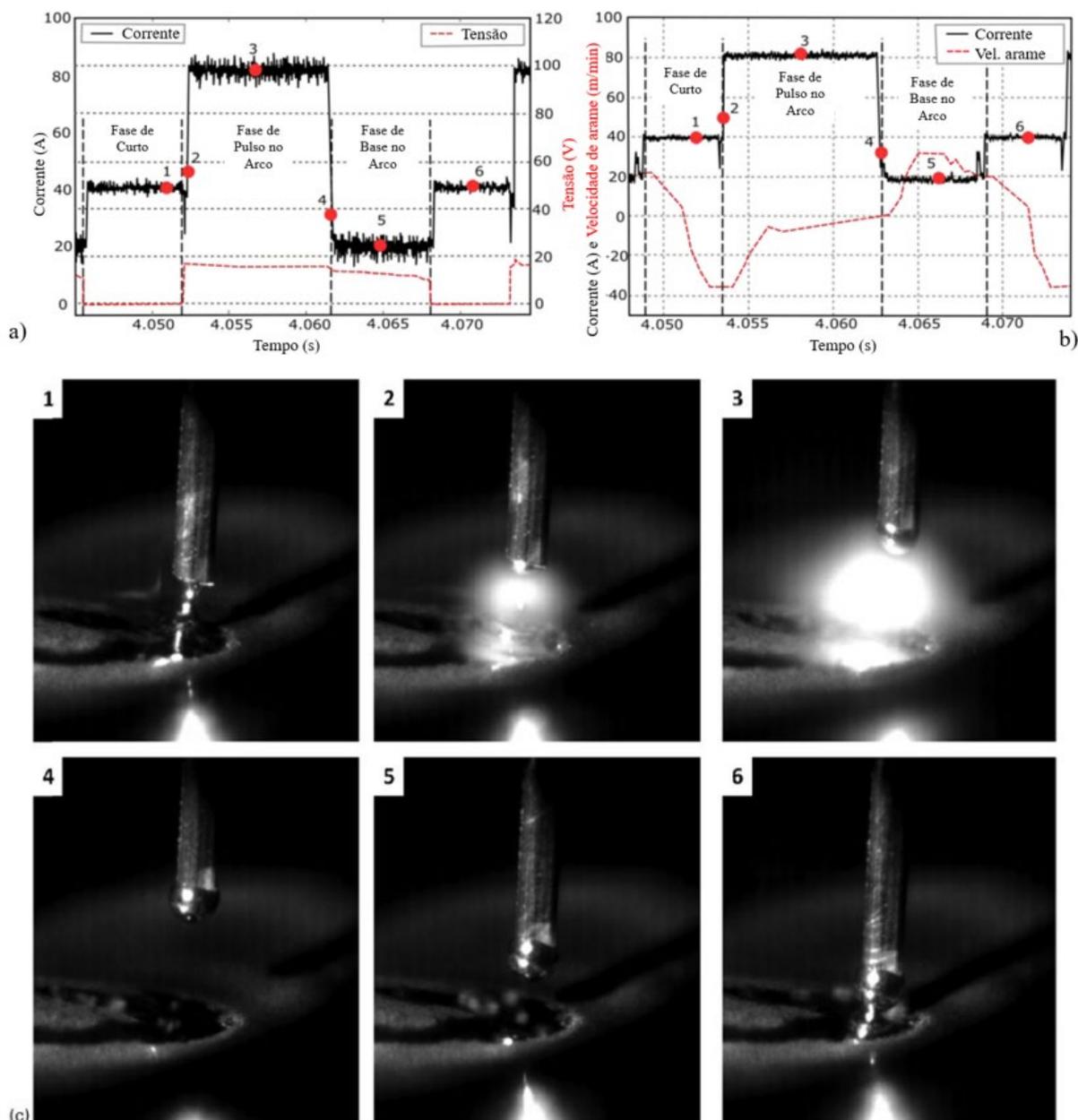
(d): Tempo de espera; (g) Estricção da ponte metálica; (c) Reabertura do arco

Fonte: Adaptado de [82]

Rotinas que previnem a abertura do arco evoluíram até que uma solução ainda mais complexa foi apresentada com o advento a tecnologia de alimentação dinâmica. O recuo do arame força o destacamento da gota e torna o momento da reabertura do arco previsível. Depois da Fronius outras empresas também desenvolveram tecnologias similares, como a Panasonic com o AWP (*Active Wire Process*), a SKS com o micro-MIG e a Jetline com o CSC (*Controller Short Circuit*) [82]. A tecnologia CMT uniu o controle do movimento do arame com uma estratégia para a onda de corrente, como

mostra a Figura 37. A potência utilizada no processo CMT é apontada como maior [83] ou menor [84] do que o processo GMAW convencional, a depender das condições de contorno, o que gera discussões a respeito do processo ter a palavra “cold” (frio) no nome.

Figura 37 - Forma de onda do CMT; a) Tensão e corrente; b) Corrente e velocidade de arame; c) imagens de alta velocidade

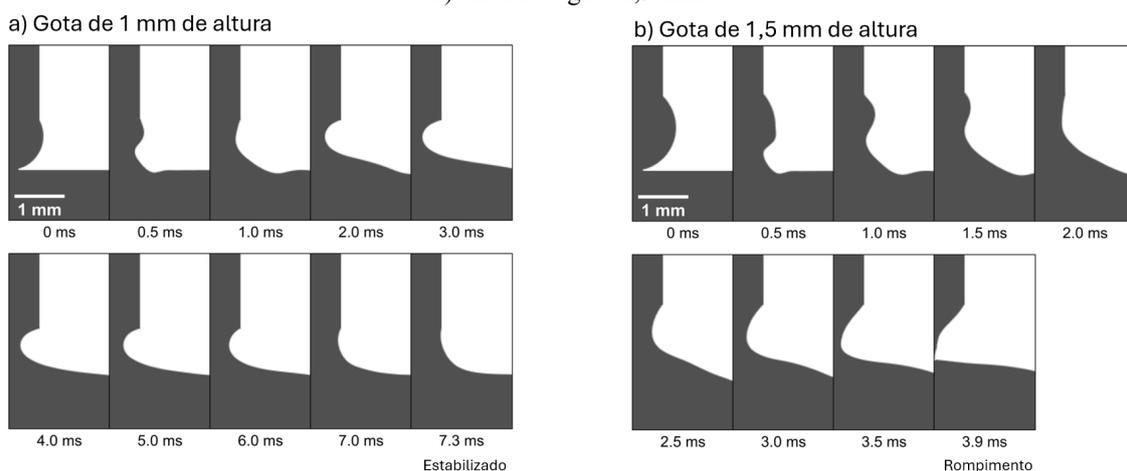


Fonte: Adaptado de [85]

Para entender melhor as vantagens do uso da transferência metálica por curto-circuito, o trabalho de Soto et al. [86] utilizou uma simulação computacional, para analisar as fases da transferência metálica em uma situação em que não se tem corrente ou movimento. A simulação considerou um estágio inicial onde a gota está em contato

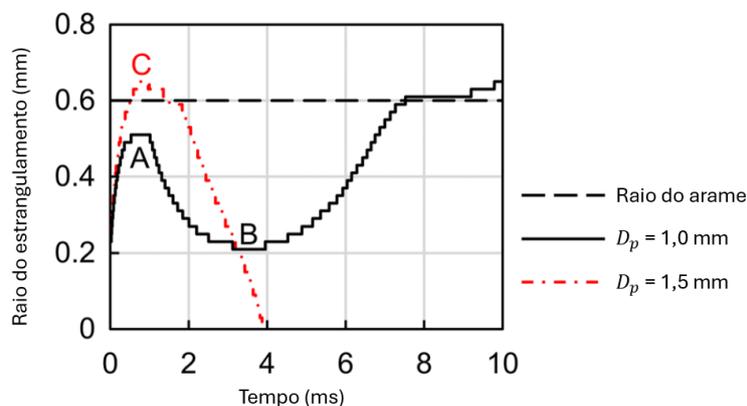
com a poça e permitiu que a simulação avalie de que maneira o efluxo e o influxo trabalham para a manutenção da ponte metálica. Foram considerados duas alturas de gota, 1,0 mm e 1,5 mm. Foi possível constatar que no caso da gota de 1,5 mm, ao ocorrer a coalescência a energia oriunda do gradiente de pressão positivo, de dentro da gota curvada, foi convertida em energia cinética do fluido. O efluxo abrupto corroborou para um estreitamento instável da ponte metálica. O resultado foi o rompimento da ponte metálica para a gota com altura de 1,5 mm. Ao utilizar a gota de 1,0 mm, o gradiente de pressão foi menor, resultando em um efluxo de menor intensidade, permitindo que ocorresse um efluxo, posteriormente, que estabilizou a ponte metálica. Os frames da simulação de ambos são apresentados na Figura 38. Enquanto a medida do raio da região de estrangulamento da ponte metálica é apresentada na Figura 39. É possível ver que o ponto B marca o momento em que se inicia o influxo na gota de 1,0 mm. A utilização das medidas em altura de gota são derivadas das condições de contorno da simulação.

Figura 38 - Perfis de superfície na transferência por curto-circuito autônoma. a) Altura de gota 1 mm. b) Altura de gota 1,5 mm.



Fonte: Adaptado de [86]

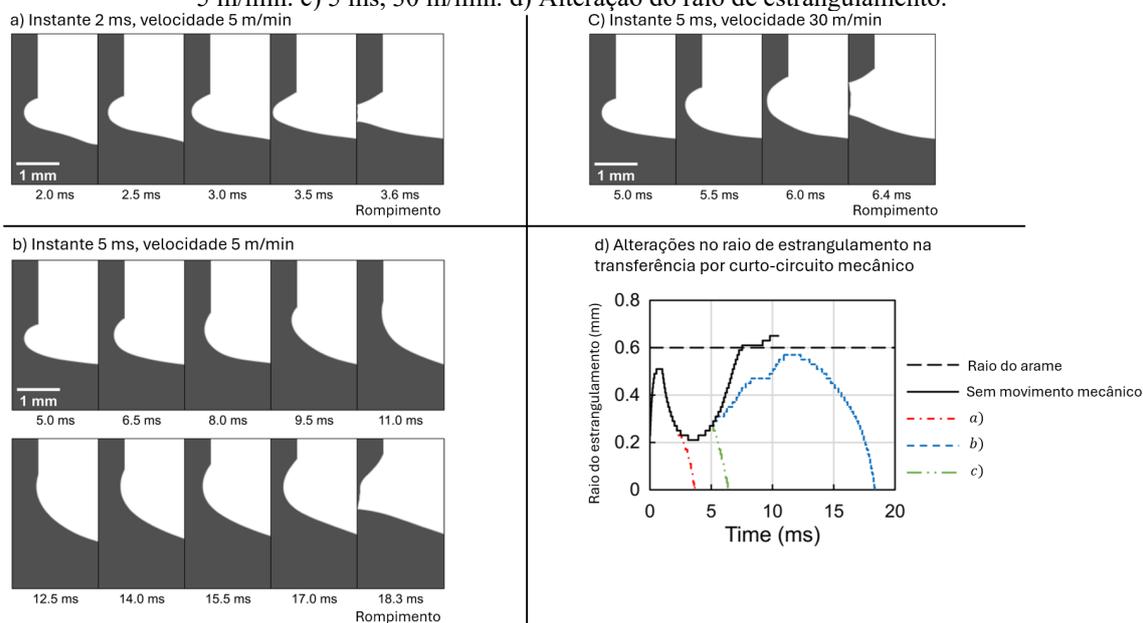
Figura 39 - Alterações no raio de estrangulamento na transferência por curto-circuito autônoma.



Fonte: Adaptado de [86]

O mesmo trabalho que apresenta esta simulação também avaliou o processo, sem corrente, utilizando o movimento mecânico do arame de retração. Foi utilizado como exemplo a gota de 1,0 mm para esta análise. O estudo utilizou como ponto inicial do movimento de retração do arame dois instantes diferentes, o de 2 ms e de 5 ms, nos quais constatou-se um raio, da região de estrangulamento, similar, aproximadamente 0,27 mm, como já apresentado na Figura 39. Ao iniciar o movimento de retração do arame antes de iniciar o influxo, 2 ms, o rompimento ocorreu em 3,6 ms, como mostra o item a) Figura 40. Enquanto no instante 5 ms, o influxo já iniciou, o rompimento ocorreu em 18,3 ms, item b) Figura 40. Em ambos os ensaios foi considerado uma velocidade de retração de 5 m/min. A fim de avaliar se a velocidade de retração pode alterar o resultado, fez-se uma terceira simulação, iniciada pelo movimento de retração em 5 ms a uma velocidade de 30 m/min. O resultado foi um rompimento em 6,4 ms, item c) Figura 40. Em conclusão, a estratégia de retroceder o arame antes de iniciar o influxo do metal líquido tem o melhor resultado, contudo a velocidade de retração tem a capacidade de auxiliar na redução do tempo para o rompimento da ponte metálica, como está ilustrado no item d) da Figura 40.

Figura 40 – Perfis de superfície na transferência por curto-circuito mecânico. A) 2 ms, 5 m/min. b) 5 ms, 5 m/min. c) 5 ms, 30 m/min. d) Alteração do raio de estrangulamento.



Fonte: Adaptado de [86]

2.1.5.1 Mergulho do arame sólido na poça de fusão

Um estudo feito utilizando um modelo computacional aliado a ensaios práticos, utilizando o processo TIG, avaliou de que maneira o arame sólido inserido na poça de fusão, interfere no processo. O resultado foi uma absorção de 10% da energia atribuída a poça, pelo arame, utilizando uma corrente média de 150 A. A solda resultante do ensaio prático apresentou uma redução na penetração na região onde foi inserido o arame na poça de fusão. Esta característica é resultado da alteração do fluxo de metal líquido, causada pela inserção do arame sólido na poça de fusão[87].

A análise da influência do mergulho do arame sólido na poça de fusão para o processo GMAW-DF, foi tema de trabalho desenvolvido no Labsolda [16]. Os resultados indicam um aumento na taxa de fusão de arame utilizando a técnica de mergulho na poça. As condições para o experimento estão listadas na Tabela 3 e Tabela 4.

Tabela 3 - Parâmetros comuns dos testes feitos para avaliar o mergulho do arame sólido na poça de fusão.

| | Descrição | Unidade |
|---------------------------------|--------------------|---------|
| Material de base | Aço ao Carbono A36 | - |
| Espessura do material de base | 12,6 | mm |
| Material do arame | Aço ER70S-6 | - |
| Diâmetro do arame | 1,2 | mm |
| Gás de processo | Ar-CO2 (8%) | - |
| Vazão de gás | 12 | l/min |
| DBCP | 17 | mm |
| Velocidade de soldagem | 0,25 | m/min |
| Velocidade de arame | 5,5 | m/min |
| Comprimento do cordão | 80 | mm |
| Programa da fonte | G3Si | - |
| Parâmetro de correção dinâmica | 0 | - |
| Parâmetro de correção de arco | 0 | % |
| Parâmetro de correção de arco 2 | 0 | % |

Fonte: [16].

Tabela 4 - Parâmetros dos experimentos 1 e 2 para avaliar o mergulho do arame sólido na poça de fusão.

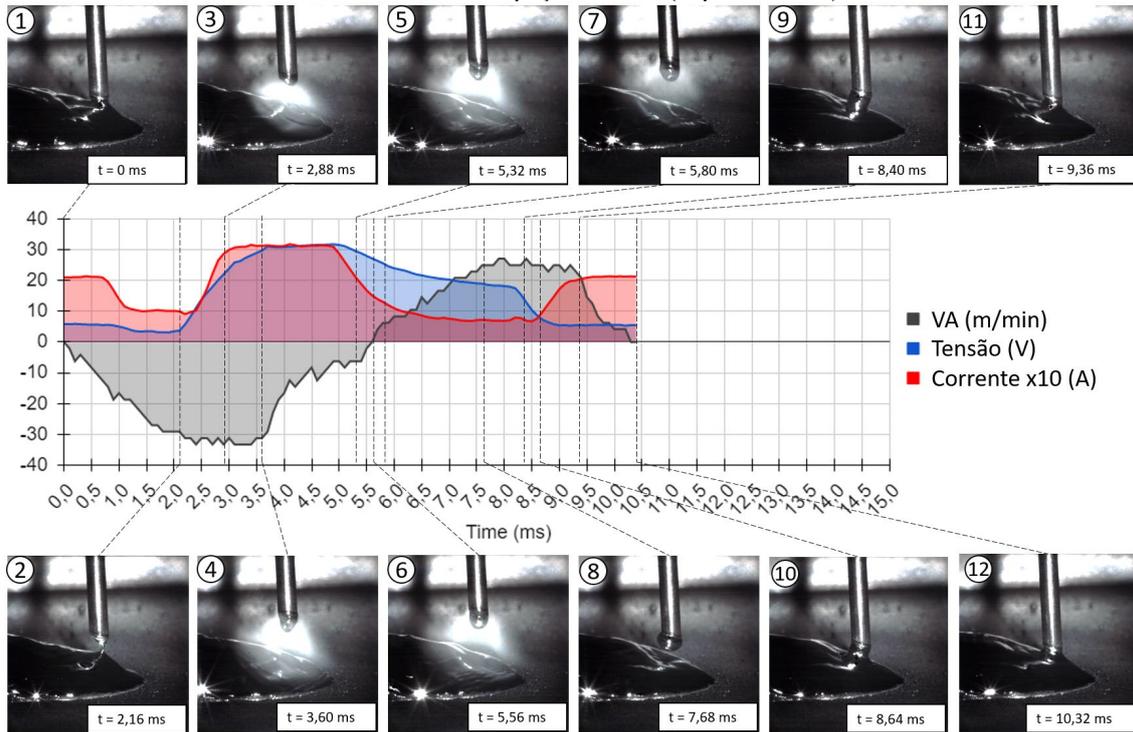
| Descrição | Experimento 1 | Experimento 2 | Unidade |
|------------------------------|-----------------------|-----------------------|---------|
| | Vd_sc_wait = 25 m/min | Vd_sc_wait = 55 m/min | |
| VA | 4,8 | 4,2 | m/min |
| Potência | 3156 | 2097 | W |
| Tensão | 16,3 | 11,5 | V |
| Corrente | 158 | 143 | A |
| Frequência de curto-circuito | 92 | 66 | Hz |
| Taxa de deposição | 2,7 | 2,0 | kg/h |

Fonte: [16].

A fonte de soldagem da Fronius CMT Advanced 4000R não possui um parâmetro com a finalidade de mergulhar o arame sólido na poça de fusão. A lógica da fonte é retornar o arame após a detecção do curto-circuito. Para conseguir mergulhar o arame foi necessário elevar a velocidade de avanço do arame em 220%, para que o motor da tocha não tivesse capacidade de retornar o arame logo após a detecção do curto. As filmagens de alta velocidade permitiram confirmar que o arame mergulhava na poça, contudo a aceleração do arame não foi constante, comportamento atribuído a lógica de programação da fonte, submetida a condições fora de padrão do fabricante. Apesar disso foi possível executar o experimento. Ao comparar o oscilograma da Figura 41 com o da Figura 42 é possível constatar um aumento no período da transferência, consequência do maior tempo em curto-circuito. A imagem 12 da Figura 41 destaca que não ocorreu o mergulho do arame, já na imagem 12 da Figura 42 o arame sólido está mergulhado na poça.

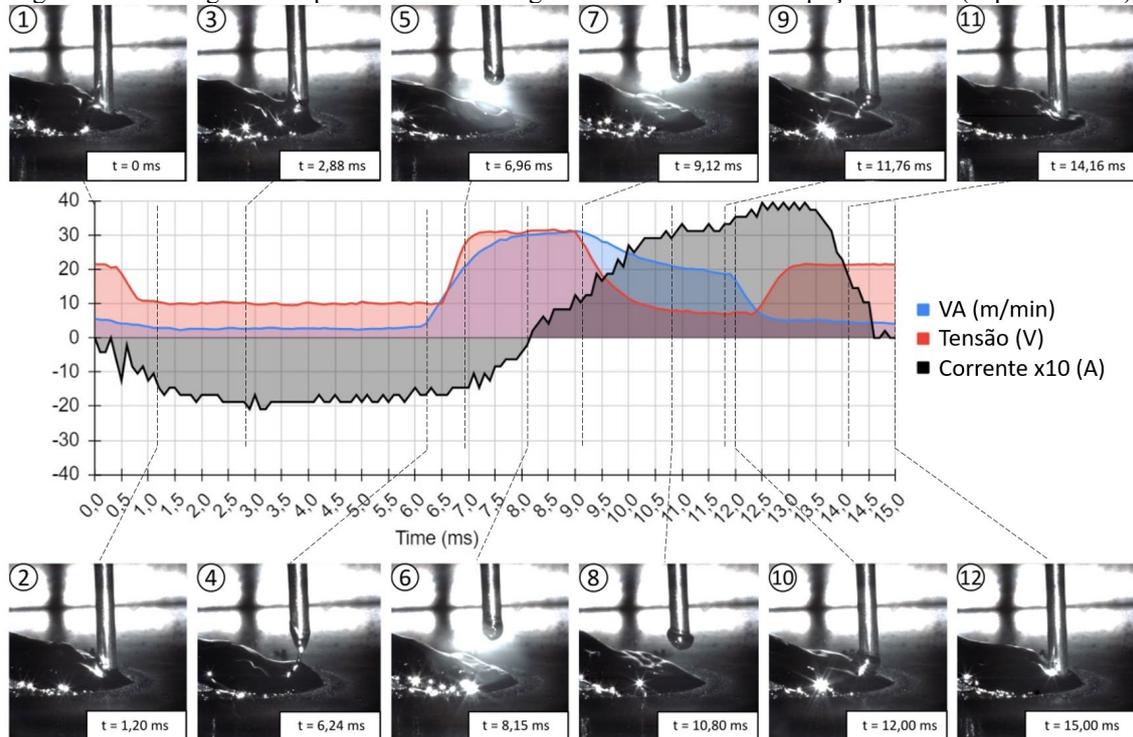
Uma consequência do aumento do tempo de curto foi a redução da potência aportada. Com o objetivo de comparar os resultados obtidos no experimento 2 com um experimento feito com a mesma potência, foi executado um terceiro experimento o qual mantém os parâmetros do sinérgico da fonte, mas reduz a potência fornecida. Para reduzir a potência na fonte da Fronius o operador é obrigado a reduzir a velocidade de alimentação de arame. O experimento 3 foi utilizado para comparar a relação de energia por taxa de deposição de arame.

Figura 41 - Oscilograma do processo com a parametrização padrão da fonte da Fronius, sem o mergulho do arame sólido na poça de fusão (experimento 1).



Fonte: Autor.

Figura 42 - Oscilograma do processo com o mergulho do arame sólido na poça de fusão (experimento 2).



Fonte: Autor.

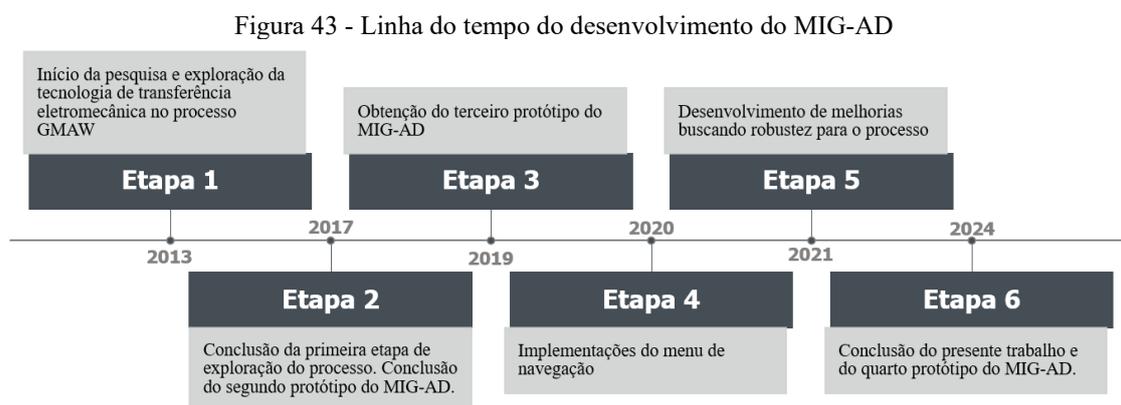
A conclusão do trabalho foi de que apesar de não possuir o parâmetro específico para o experimento foi possível efetuar o mergulho do arame sólido na poça de fusão. O resultado desta técnica, até o momento, sugere um aumento significativo da eficiência na fusão de material e uma aceleração do resfriamento do cordão, algo que deve ser melhor explorado para levantar mais dados e confirmar essa teoria.

3 MATERIAIS, EQUIPAMENTOS E METODOLOGIA

Neste capítulo, serão apresentados os materiais e equipamentos empregados no desenvolvimento deste trabalho, bem como métodos utilizados para coleta de dados e análises dos resultados.

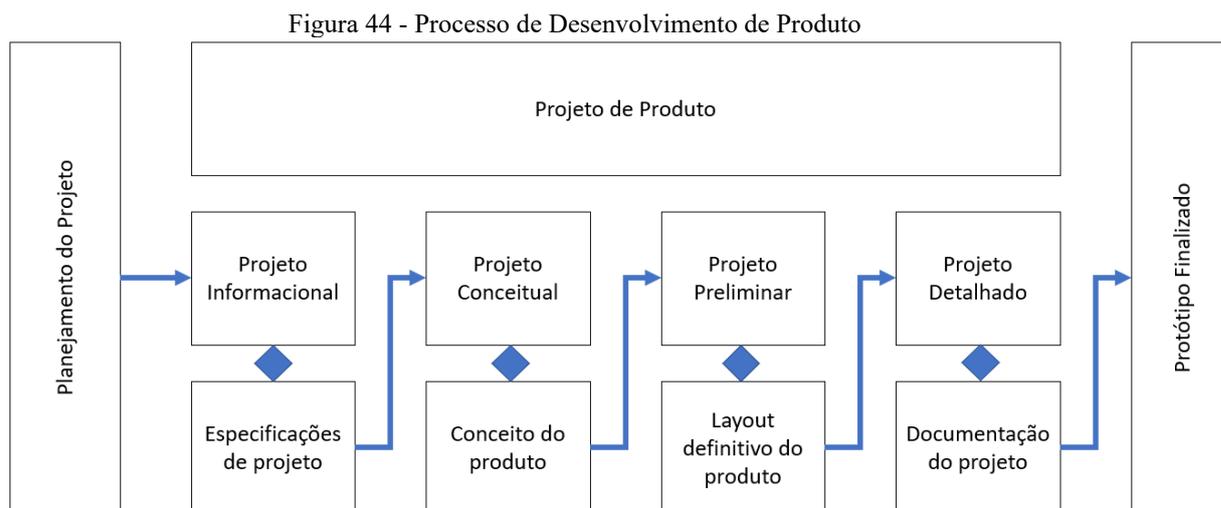
3.1 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

Para iniciar a exploração dos parâmetros que caracterizam o processo GMAW-DF, foi necessário conceber uma fonte de soldagem com alimentação dinâmica de arame onde todos os parâmetros do processo, incluindo os parâmetros de controle do movimento do arame, estejam abertos ao operador. A fonte de soldagem em questão foi nomeada como MIG-AD, e já faz parte de um desenvolvimento contínuo do laboratório LABSOLDA, como ilustrado na Figura 43.



Fonte: Autor.

Devido à complexidade do desenvolvimento de um equipamento mecatrônico dessa envergadura, o desenvolvimento dos componentes, que contemplam a fonte MIG-AD, foi guiado pelo processo de desenvolvimento de produto o qual segue os passos da Figura 44.



Fonte: Adaptado de [88]

A fonte de soldagem MIG-AD conta com um buffer, também chamado de pulmão, para fornecer arame para a tocha com o mínimo de atrito com o mangote, assim, reduzindo o esforço do servomotor ao avançar o arame contra a poça e também permitindo um movimento de recuo do arame. Detalhes do desenvolvimento do buffer estão no Apêndice 1.

A tocha desenvolvida conta com um servomotor, responsável pelo controle do movimento do arame. O projeto mecânico foi elaborado com o objetivo de permitir análise e ensaios com filmagem de alta velocidade do rolete acoplado ao eixo do motor. Esta estratégia permitiu a filmagem simultânea do rolete e da ponta do arame enquanto a soldagem estava ocorrendo, assim, confirmando que não estava ocorrendo escorregamento do arame no rolete. Este ensaio contou com duas câmeras de alta velocidade sincronizadas por um controle óptico, como ilustrado na Figura 125. Outros detalhes do projeto mecânico, como o isolamento elétrico do motor e do arame de solda e os modelos de pescoço utilizados na tocha estão em detalhes no Apêndice 2.

O código fonte da fonte de soldagem foi desenvolvido com estratégias de controle que permitem total ajuste pelo usuário, diretamente na interface da fonte. Os parâmetros disponíveis estão listados na Figura 128. As estratégias de controle do movimento do arame, sincronizado com a onda de corrente, estão apresentadas no Apêndice 3, em que são apresentados fluxogramas do código fonte.

O arame de adição utilizado durante os ensaios foi o arame de aço ER70S-6, com diâmetro de 1,2 mm, e sua composição química está especificada na Tabela 5. A chapa utilizada como material base para deposição dos cordões teve a sua dimensão alterada em

alguns ensaios, embora o material utilizado em todos os ensaios foi o aço ao carbono ASTM A36, cuja composição é apresentada na Tabela 6.

Tabela 5 - Composição química do metal de adição (ER70S-6)

| Elemento | C | Cu | Cr | Mn | Mo | Ni | P | S | V |
|------------|------|-----|------|------|------|------|-------|-------|------|
| Mínimo (%) | 0,06 | - | - | 1,4 | - | - | - | - | - |
| Máximo (%) | 0,15 | 0,5 | 0,15 | 1,85 | 0,15 | 0,15 | 0,025 | 0,035 | 0,03 |

Fonte: [89]

Tabela 6 - Composição química da chapa

| Elemento | C | Cu | Cr | Mn | Mo | Ni | P | S | Si | V |
|--------------------------------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-----|-------|
| Aço ao carbono ASTM A36 (%) | 0,18 | 0,17 | 0,16 | 0,68 | 0,02 | 0,07 | 0,011 | 0,016 | 0,2 | 0,003 |

Fonte: [89]

Para atingir o correto funcionamento do sistema de controle do equipamento MIG-AD, utilizou-se de equipamentos de medição e filmagem já disponíveis no laboratório, o que permitiu entender e caracterizar o sistema de controle eletromecânico. Toda a infraestrutura de oficina mecânica, incluindo corte térmico, serras, fresadora, entre outros, de inspeção e análise (raios-x computadorizado, ultrassom, microscópio ótico, microdurômetro) disponível no LABSOLDA deram suporte à preparação e análise de amostras e corpos de prova.

3.2 METODOLOGIA

Com acesso aos parâmetros de velocidade e aceleração do arame, foi necessário um conjunto de ensaios para entender quais os parâmetros atribuiriam ao processo melhores resultados. Para isso elaborou-se um conjunto de ensaios, detalhados no Apêndice 4 e Apêndice 5, que permitiram uma maior compreensão dos limites da aceleração e da desaceleração do servomotor. Ao longo dos ensaios as velocidade e acelerações não foram alteradas, apesar de ser possível em trabalhos futuros explorar ainda mais estes parâmetros.

A onda de corrente foi configurada para ser parametrizada por 6 parâmetros principais, sendo eles: APT (*Arc Pulse Time*, tempo de pulso no arco), APC (*Arc Pulse Current*, corrente de pulso no arco), ABC (*Arc Base Current*, corrente de base no arco),

SPT (*Short-circuit Pulse Time*, tempo de pulso no curto-circuito), SPC (*Short-circuit Pulse Current*, corrente de pulso no curto-circuito), SBC (*Short-circuit Base Current*, Corrente de base no curto-circuito), conforme ilustra a Figura 128.

Após ajustar estes valores de maneira a possibilitar a reprodução de um cordão de solda uniforme, sem poros ou respingos, deu-se início a análise dos parâmetros referentes a onda de corrente, de forma individual, buscando entender de qual maneira o processo se comporta à medida que cada parâmetro é alterado, também individualmente. Para uma melhor clareza, a análise dos parâmetros foi dividida em parâmetros atribuídos a fase de arco da onda de corrente, seção 4.2.1, e parâmetros da fase de curto-circuito, seção 4.2.2.

Um programa no Matlab foi desenvolvido para processar os dados de soldagem, como tensão e corrente adquiridos com a maleta SAP, com taxa de aquisição de 50 kHz. A partir destes resultados foi possível mensurar os tempos de arco, curto-circuito, a frequência de destacamento e o desvio padrão destes parâmetros.

A câmera de alta velocidade, IDT MotionPro Y4-S2, também foi utilizada para auxiliar na caracterização do comportamento do processo ao longo dos testes, com uma taxa de aquisição de quadros em 5 mil quadros por segundos. O pós-tratamento dos frames permitiu avaliar a altura máxima do arco e comportamentos indesejados, como a abertura prematura do arco.

Ao unir os dados aquisitados de corrente e tensão com as filmagens de alta velocidade foi possível analisar as alterações no comportamento do processo ao alterar cada parâmetro da onda de corrente.

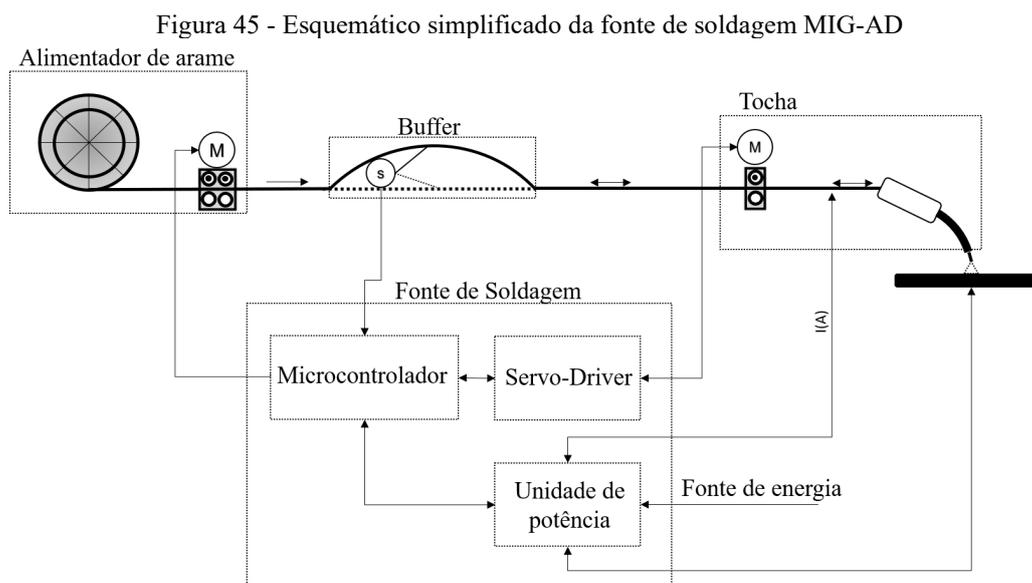
A aplicação da fonte de soldagem MIG-AD em revestimento e manufatura aditiva teve como objetivo avaliar o comportamento da fonte ao ser utilizada nestas aplicações. A sua aplicação em revestimento permitiu que fossem aperfeiçoadas as rotinas de início e fim de cordão no código fonte do MIG-AD. Os ensaios de fabricação de peças por adição de camadas permitiu analisar o comportamento da fonte enquanto ocorrem variações na DBCP (distância do bico de contato com a peça).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresentará os resultados obtidos neste trabalho. As análises dos resultados são apresentadas por meio de imagens e vídeos, por meio do uso de QRCode com o link.

4.1 FONTE MIG-AD

A fonte concebida utiliza basicamente uma unidade de potência com capacidade de atingir até 500 A de corrente alternada, da empresa IMC, um buffer confeccionado em impressão 3D, Apêndice 1, e um conjunto de servo acionamento para o controle do arame na tocha, Apêndice 2. A Figura 45 apresenta um esquema simplificado dos principais componentes que integram a fonte, nomeada como MIG-AD.



Fonte: Autor.

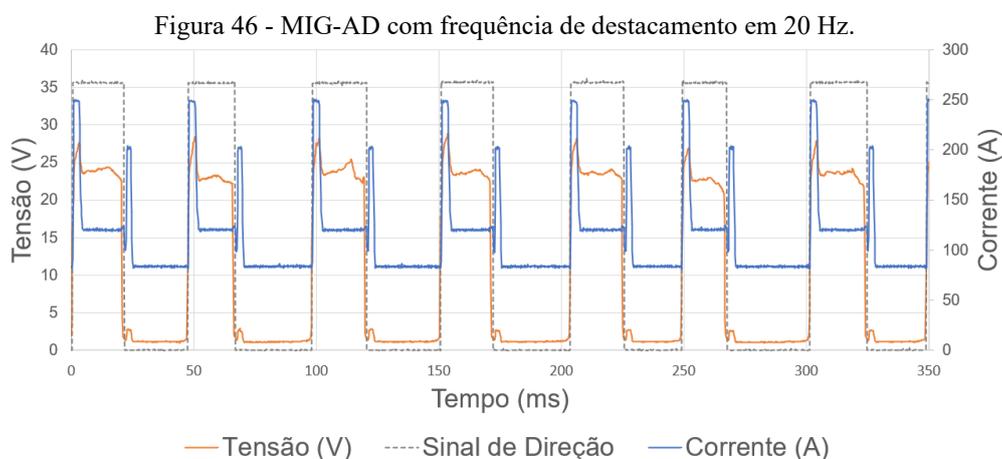
4.1.1 Análise do movimento do motor

Uma das chaves para o sucesso do processo de soldagem GMAW com alimentação dinâmica é o domínio do controle do movimento do arame. Alguns trabalhos utilizam uma engenharia criativa na busca de melhores soluções para o controle do movimento do arame [69] [73], contudo o que se utiliza comercialmente na atualidade é

um servomotor acoplado a um rolete, o qual transfere o movimento do motor para o arame.

O conjunto servomotor e servo driver são protagonistas no ecossistema mecatrônico da fonte de soldagem GMAW com tecnologia de alimentação dinâmica. A escolha do servomotor como fonte de movimento para esta função é fundamentada na necessidade de características como alta velocidade, grande capacidade de torque e precisão no deslocamento do arame. Apesar destas qualidades estarem presentes em um servomotor, a dinâmica exigida pelo processo que se desenvolve neste trabalho requer um desempenho excepcional. Compreender e quantificar o desempenho é o propósito desta análise.

No início do desenvolvimento deste trabalho já se havia constatado a dificuldade em parametrizar o servo driver para que fosse possível utilizar a alimentação dinâmica, a maior frequência de destacamento atingida até o momento, por exemplo, havia sido de 20 Hz, o oscilograma do processo está apresentado na Figura 46. Ao aumentar a velocidade de avanço do arame, o arame afundava na poça, desestabilizando o processo e criando longos períodos de curto-circuito. Em alguns eventos a ponta do arame era soldada no fundo da poça, provocando a movimentação da tocha em direção à peça no instante que o arame deveria estar recuando. Ou seja, devido à parametrização do servo driver, os tempos de inversão de movimento estavam grandes, interferindo significativamente no período de transferência. Ao aumentar a velocidade de avanço a situação piorava, pois o excesso de deslocamento (*overshoot*) seria ainda maior.



Fonte: Autor.

O vídeo disponível no link da Figura 46 apresenta como o processo passou a operar logo após a atualização da tocha de soldagem, estágios iniciais deste trabalho. As velocidades de aproximação do arame com a poça e o tempo necessário para que o motor revertesse o movimento do arame eram tão lentas que a taxa de frequência de destacamento alcançada foi de apenas 20 Hz. Apesar disso, o processo se manteve estável.



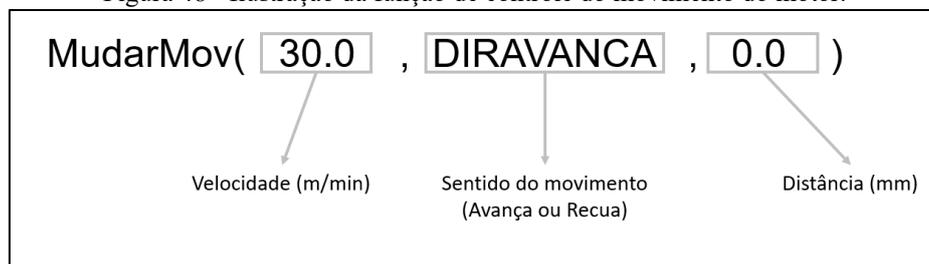
Figura 47 - Link para vídeo do processo MIG-AD com frequência de deposição em 20 Hz

Além dos problemas para atingir as acelerações necessárias, alguns ensaios feitos de maneira qualitativa para velocidades de soldagem específicas, apresentaram respostas não lineares na velocidade e na aceleração do movimento. Com o objetivo de ampliar a compreensão técnica da resposta do motor, foi proposto um ensaio sem a utilização de arco elétrico, com o único foco no funcionamento do motor em diferentes condições. O ensaio teve início com o motor em velocidades de regime, posteriormente, foram conduzidos alguns ensaios com movimentos dinâmicos, de avança e recua, em alta frequência.

Antes de apresentar os ensaios com o servomotor é importante compreender de que maneira o firmware comanda o motor, apresentado em detalhes no Apêndice 3. A Figura 48 apresenta a função desenvolvida para comandar o motor, função nomeada como “MudarMov”. O primeiro valor, apresentado na função, corresponde a velocidade de arame, exemplificado na Figura 48 como 30.0 m/min (645 rpm). O segundo item a ser definido, na função “MudarMov”, é o sentido do movimento, o exemplo utilizado na Figura 48 foi o “DIRAVANCA”. Ao utilizar “DIRAVANCA”, na função “MudarMov”, o arame será deslocado no sentido da poça de fusão. Quando é necessário mover o arame no sentido contrário a poça de fusão, é utilizado “DIRRECUA”. O último item a ser configurado na função “MudarMov” é a distância que se deseja percorrer, a qual corresponde a quantos milímetros o arame deverá avançar ou recuar. Quando configurado

em zero, como no exemplo da Figura 48 o motor gira indefinitivamente, até receber o próximo comando.

Figura 48 - Ilustração da função de controle do movimento do motor.



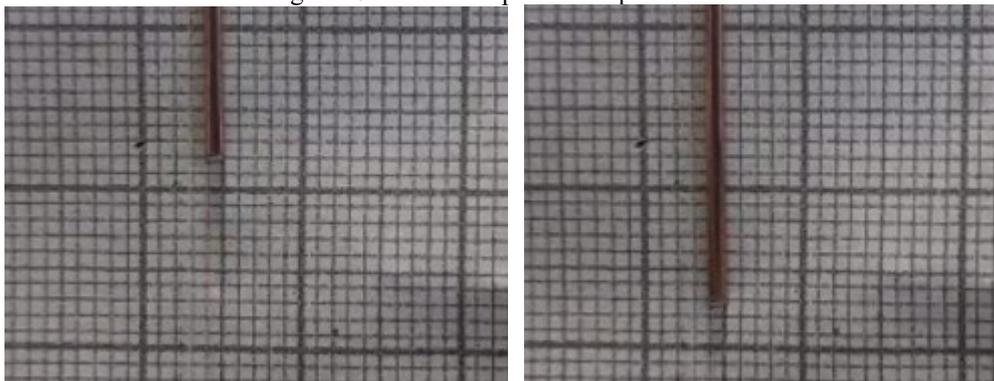
Fonte: Autor.

A seguir apresentam-se os resultados de quatro ensaios. O primeiro ensaio avalia se o terceiro parâmetro da função “MudarMov”, referente a distância, iguala-se à distância percorrida pelo arame. O segundo ensaio avaliará se a velocidade do motor, já em velocidade de regime, corresponde ao valor configurado na função “MudarMov”. O terceiro ensaio avalia o desempenho do motor em movimentos de avança e recua, a uma frequência de 100 Hz. O quarto ensaio utilizará uma técnica, buscando reduzir o tempo de resposta do motor em movimentos dinâmicos de alta frequência.

4.1.1.1 Primeiro ensaio: Distância

O primeiro ensaio proposto avalia a distância percorrida pelo arame em frequências baixas de inversão do sentido do movimento. Para este propósito foi utilizada uma escala milimetrada ao fundo do arame para mensurar, com o auxílio de uma câmera, a distância total percorrida pelo arame e configurou-se a distância em 10 mm. A velocidade de arame utilizada foi de 50 m/min, correspondendo a 1076 rpm do eixo do motor, para obter algumas amostras foi inicialmente utilizado o parâmetro “DIRAVANCA”, e após 10 segundos foi utilizado o “DIRRECUA” para recuar o arame com a mesma velocidade e distância. Assim, foi possível avaliar tanto no movimento de avanço quando no de recuo, se a distância total percorrida pelo arame coincide com o valor configurado na função. O resultado do ensaio foi de que a distância percorrida pelo arame, em baixa frequência, está de acordo com o valor configurado na função “MudarMov”, como apresentado na Figura 64.

Figura 49 - Distância percorrida pelo arame.



Fonte: Autor.

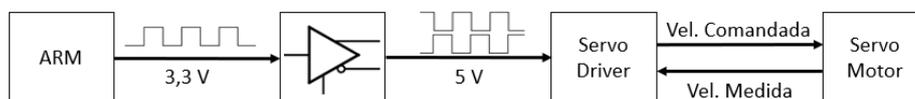
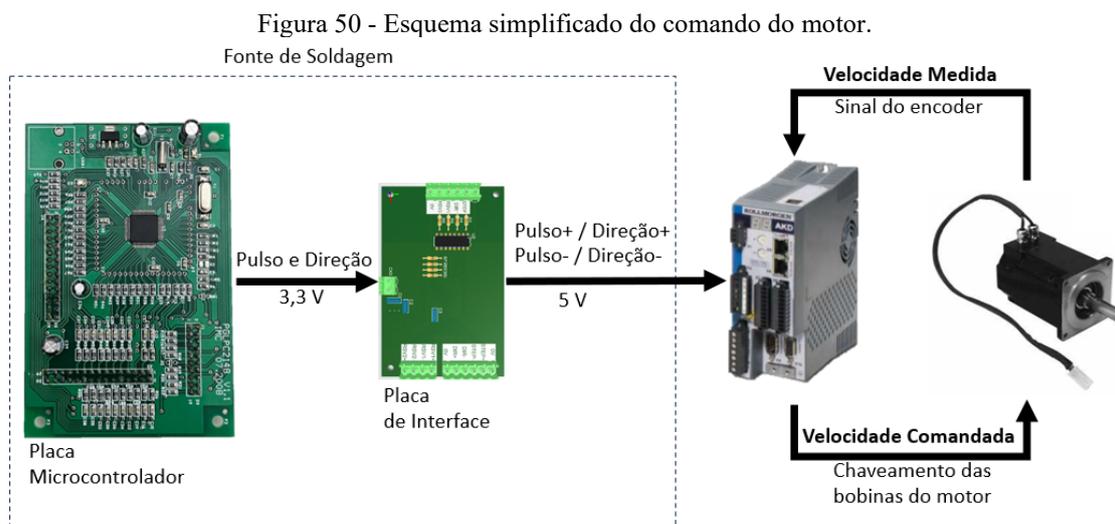
4.1.1.2 Segundo ensaio: *Velocidade em regime*

O segundo ensaio tem como objetivo avaliar o parâmetro de velocidade utilizado na função “MudarMov”. Para este propósito, buscou-se utilizar uma ampla faixa de velocidades, iniciando em 200 m/min até 1000 m/min. Contudo, a velocidade de regime máxima permitida para o motor é de 9600 rpm, equivalente a 446 m/min de arame. O valor de 9600 rpm corresponde ao parâmetro “VL.VFTHRESH” do servo driver, o qual limita o valor de velocidade máxima do motor em 1,2 vezes o parâmetro “MOTOR.VMAX”, o qual não é ajustável devido as restrições do driver para segurança do servomotor. O valor da distância da função “MudarMov”, já apresentada anteriormente, foi mantido em zero para que o motor movimentasse em um único sentido, sendo escolhido o sentido de avanço.

A proposta inicial de testar valores de até 1000 m/min, de velocidade de arame em regime, limitou-se aos resultados dos testes que antecedem o valor de 450 m/min. Apesar de já conhecer o valor da velocidade máxima permitida, as velocidades de 450, 500, 600, 700 e 1000 m/min também foram testadas. Todos os valores superiores ao parâmetro “VL.VFTHRESH” do servo driver resultaram na falha e desarme do servo driver por excesso de velocidade.

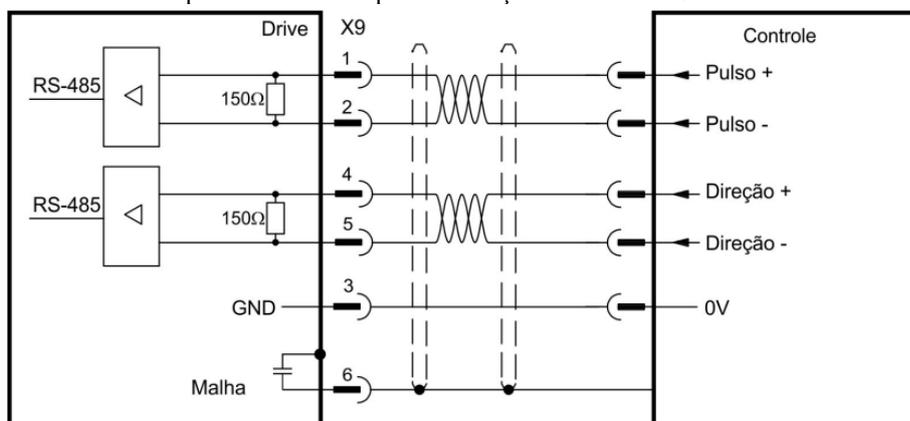
Para um melhor entendimento dos resultados deste ensaio, faz-se necessário uma compreensão básica dos sinais envolvidos no comando e feedback do motor. A Figura 50 apresenta um esquema simplificado, na qual observa-se o microcontrolador emitindo um sinal de pulso e direção, também conhecido na literatura como step/dir, com base na configuração realizada no firmware da fonte, especificamente na função "MudarMov", já

apresentada anteriormente na Figura 48. A placa de interface entre o microcontrolador da fonte e o servo driver é responsável por amplificar e gerar o sinal negativo do pulso e direção, sinais necessários para comandar o motor pela entrada X9 do servo driver, Figura 51. A entrada X9 do servo driver é responsável por receber os sinais de pulso e direção, permitindo ao servo driver interpretar, com base na frequência dos pulsos, o valor da “Velocidade Comandada”. O motor é equipado com um encoder que retorna para o servo driver o valor da “Velocidade Medida”, como ilustrado na Figura 50.



Fonte: Autor.

Figura 51 - Conexão para comando de pulso e direção na entrada X9 do servo driver.



Fonte:[90].

O resultado do ensaio de velocidade em regime é apresentado na Tabela 7. O item, “Valor Configurado na Fonte” corresponde ao valor inserido na função “MudarMov”. Quando comparado o valor configurado na fonte com a velocidade medida pelo encoder do servomotor, considerando a incerteza, é correto afirmar que o valor configurado na fonte corresponde a velocidade de arame.

Tabela 7 - Velocidade de regime do motor.

| Valor Configurado na Fonte | Velocidade Comandada | Incerteza Padrão | Velocidade Medida | Incerteza Padrão |
|----------------------------|----------------------|------------------|-------------------|------------------|
| 200 m/min | 201,18 m/min | 0,21 m/min | 201,17 m/min | 1,30 m/min |
| 300 m/min | 301,76 m/min | 0,21 m/min | 301,77 m/min | 1,56 m/min |
| 350 m/min | 350,92 m/min | 0,21 m/min | 350,88 m/min | 2,30 m/min |
| 440 m/min | 441,60 m/min | 0,22 m/min | 441,58 m/min | 3,19 m/min |

Fonte: Autor.

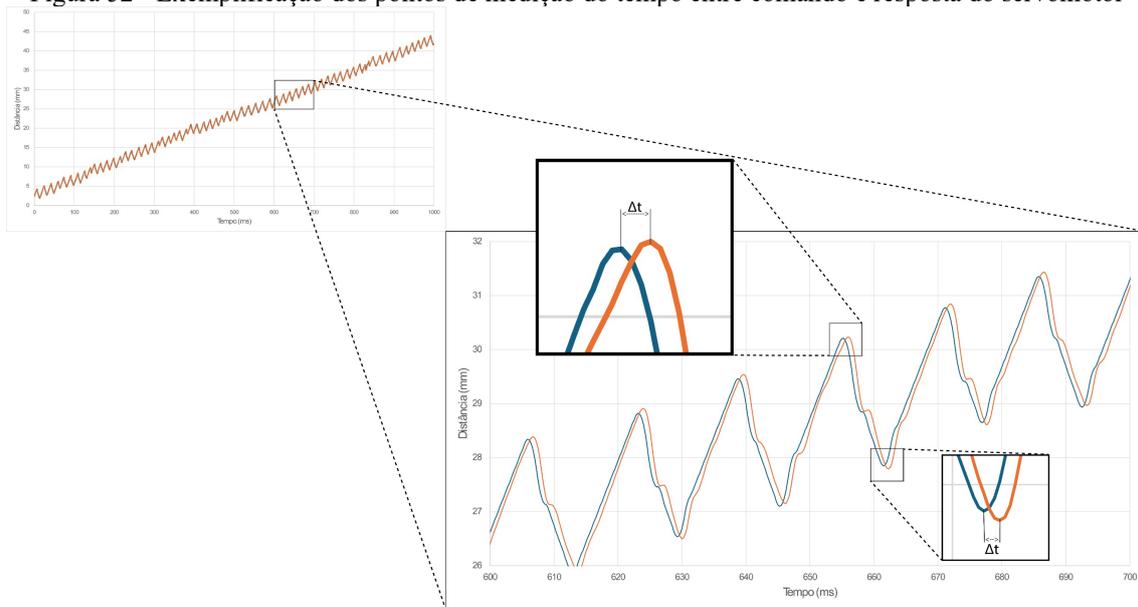
4.1.1.3 Ajustes do PID do servo driver

Os ajustes do PID iniciaram com uma série de ensaios onde a resposta do motor foi analisado utilizando diferentes estratégias de controle descritas no Apêndice 4 e no Apêndice 5.

Após muitos ajustes manuais dos valores de PID do servo driver com o auxílio do suporte da empresa Kollmorgen, e a redução da velocidade de avanço e recuo para 20 m/min, foi possível soldar utilizando a alimentação dinâmica de arame a frequências próximas a 80 Hz. Todos os ensaios realizados até esta etapa subsidiaram as tratativas com a equipe de suporte da Kollmorgen e permitiram um maior entendimento das limitações do conjunto de servo driver e servomotor.

O gráfico resultante do comando de posição e a resposta do motor mensurado pelo encoder apresentam uma crescente, devido ao consumo de arame. Foi escolhido os pontos de mudança de tendência do gráfico, seja no movimento de avanço ou recuo do arame, para calcular a variação do tempo entre o driver comandar e o motor responder ao comando, como ilustrado na Figura 52. Todos os pontos da amostragem foram calculados no Excel, utilizando uma série de funções desenvolvidas em VBA (*Visual Basic for Applications*) para automatizar essa tarefa. No total foram 4 cordões de solda executados para aquisição dos dados, com aproximadamente 160 amostras por cordão. Considerando um nível de confiança de 95%, a média das 4 amostras foi de $0,72 \pm 0,14$ ms. Os cordões de solda e os dados coletados a partir destes, serão apresentados posteriormente.

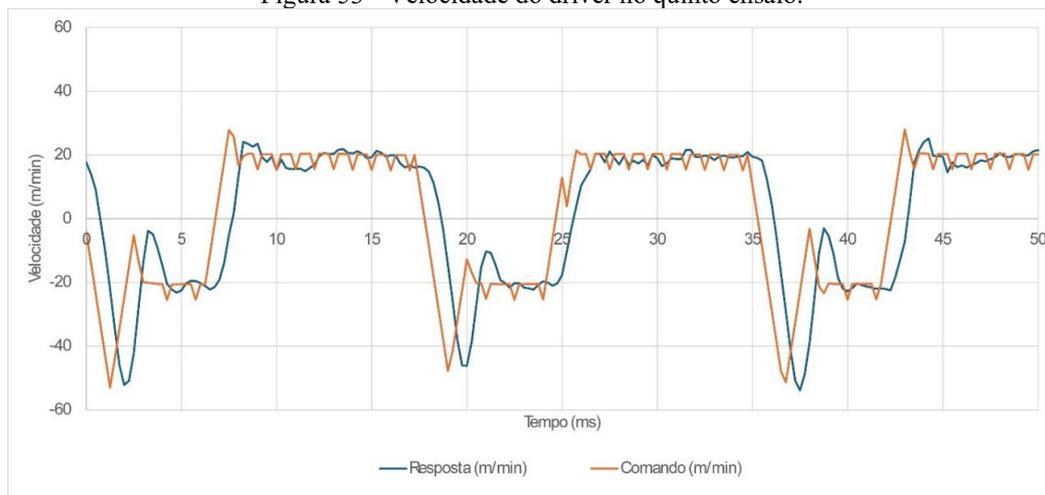
Figura 52 - Exemplificação dos pontos de medição do tempo entre comando e resposta do servomotor



Fonte: Autor.

Ao analisar o patamar de velocidade atingido na Figura 53 é possível perceber que a velocidade se estabiliza em 20 m/min, como configurado, antes do movimento de reversão. O sinal comandado e resposta do motor ainda apresentam um sobre sinal quando o motor está movendo o arame no sentido contrário a poça, contudo essa variação não afetou de maneira significativa o movimento do arame, como já apresentado na Figura 52. Esse comportamento pode tornar-se mais significativo à medida que se explora velocidades maiores de avanço e recuo do motor.

Figura 53 - Velocidade do driver no quinto ensaio.



Fonte: Autor.

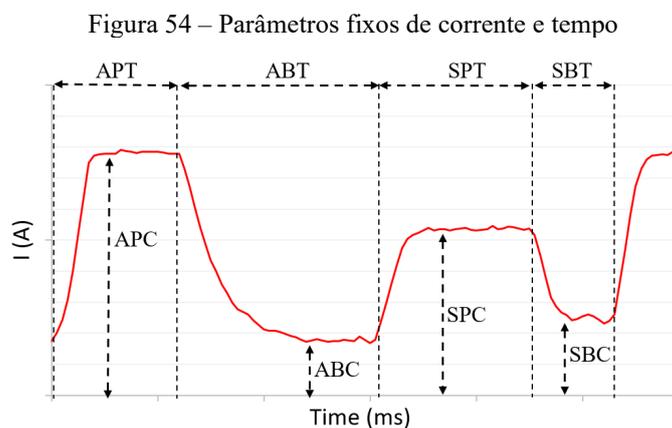
Atualmente não se utiliza nenhum conjunto de configuração padrão do servo driver. Para esta aplicação foi feita uma configuração específica, por meio de ensaios empíricos.

4.2 ANÁLISE DA TRANSFERÊNCIA METÁLICA NO MIG-AD

Com o objetivo de analisar a transferência metálica utilizando a fonte de soldagem MIG-AD, foi proposto uma análise completa dos parâmetros da onda de corrente, avaliando de que maneira cada parâmetro, individualmente, interfere na transferência metálica. Devido a extensão da análise, os resultados foram divididos em subcapítulos.

4.2.1 Análise da onda de corrente na fase de arco da transferência metálica

Este capítulo irá explorar os parâmetros de corrente da fase de arco de uma onda de corrente similar a utilizada no CMT convencional, utilizando a fonte de soldagem MIG-AD. A Figura 54 ilustra o conjunto de parâmetros que definem a forma da onda de corrente. Os valores de Arc Pulse Time (APT), Arc Pulse Current (APC) e Arc Base Current (ABC) não estão definidos na tabela da Figura 54, pois são os parâmetros que serão explorados e seus efeitos sobre o processo quantificados.



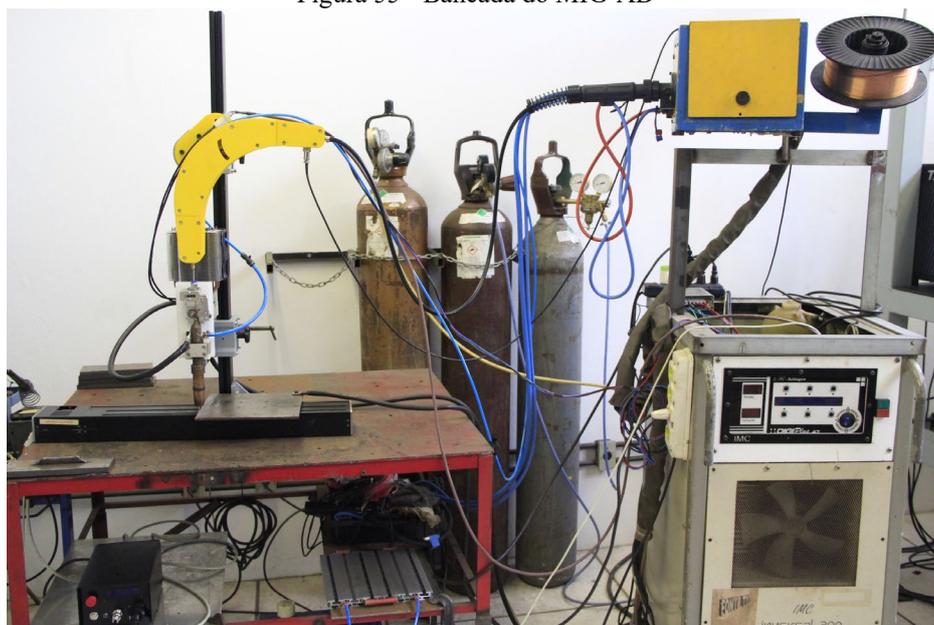
| Parameters | |
|------------------------------------------|------------------|
| Tempo de pulso no curto (SPT) | 1.5 ms |
| Corrente de pulso no curto (SPC) | 150 A |
| Tempo de base no arco (ABT) | Não configurável |
| Tempo de base no curto-circuito (SBT) | Não configurável |
| Corrente de base no curto-circuito (SBC) | 70 A |

Fonte: Autor.

Um manipulador linear automático de 1 eixo de liberdade da empresa SPS Soldagem, Figura 55, foi utilizado para controlar a velocidade de soldagem. A forma de onda de corrente utilizada com a descrição simplificada do controle do arame é apresentado na Figura 56. A chapa utilizada para deposição do cordão mede aproximadamente 76 x 206 mm com largura de 12,7 mm. O material da chapa escolhida foi o aço ao carbono ASTM A36. O arame escolhido foi o ER70S-6, com 1,2 mm de diâmetro. Para o gás de processo foi utilizado uma mistura de 8% CO₂ e 92% Argônio, com uma vazão de 15 l/min. O ensaio consistiu na deposição de 4 cordões, com o comprimento de 60 mm, na posição plana. Os cordões não foram depositados sequencialmente, limpando-se a superfície da chapa antes da deposição de cada cordão.

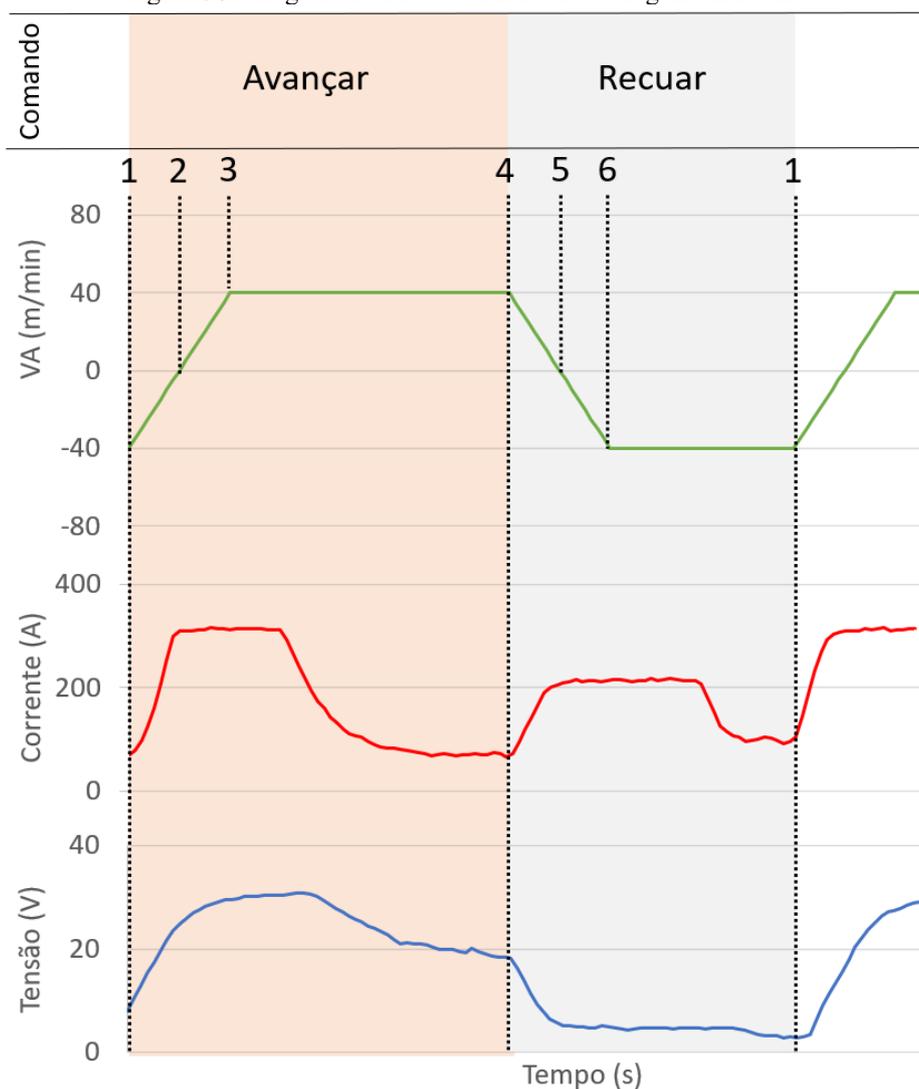
O monitoramento dos sinais elétricos foi feito com o SAP 3, capaz de capturar 50 mil pontos por segundo. A câmera de alta velocidade, IDT Motion-pro Y4-S2, foi utilizada para adquirir os sinais elétricos, de corrente e tensão, sincronizados com as imagens do processo, permitindo entender alguns comportamentos da fonte, reduzindo tempo de desenvolvimento. Por fim foi utilizado o osciloscópio integrado ao servo driver, responsável pelo controle do servomotor acoplado a tocha, para adquirir os dados relativos ao motor, como velocidade, posição e corrente nas bobinas. Este último parâmetro permite avaliar se o motor está tendo dificuldades em executar os movimentos, podendo evidenciar inclusive problemas mecânicos na tocha ou no buffer.

Figura 55 - Bancada do MIG-AD



Fonte: Autor.

Figura 56 – Lógica de controle da fonte de soldagem MIG-AD.



Fonte: Autor.

O ensaio contou com a modificação de três parâmetros do processo. Inicialmente, o valor do parâmetro APT foi ajustado de 1 a 5 ms, aumentando 1 ms a cada teste, enquanto o parâmetro APC foi mantido em 200 A e o ABC em 70 A. Na sequência do ensaio foi modificado o valor de APC, entre 50 e 400 A, aumentando em incrementos de 50 A, enquanto os valores de APT foi mantido em 3 ms e o ABC em 70 A. O último teste focou no parâmetro ABC, o qual foi alterado de 10 a 70 A, enquanto os valores de APT e APC foram mantidos em 3 e 200 A, respectivamente.

Importante ressaltar que o valor da velocidade de arame não é um parâmetro de entrada do processo, mas sim um resultado do conjunto de parâmetros empregados. A velocidade de avanço e recuo do servomotor está descrita em detalhes no capítulo em que é detalhado a lógica de controle do firmware. A aceleração do motor ficou em 300 m/s².

Os testes foram divididos em três ensaios:

- Iniciando com a análise do tempo de pulso no arco (APT). Neste ensaio os valores de APT foram alterados de 1 a 5 ms, incrementando 1 ms a cada teste.
- No segundo ensaio o valor de APT foi fixado em 3.0 ms enquanto o valor da corrente de pulso no arco (APC) foi alterada de 50 a 400 A, incrementando 50 A pôr vez.
- O terceiro ensaio avaliou a corrente de base no arco (ABC), enquanto o valor de APT e APC foram fixados em 3.0 ms e 200 A. Os valores testados em ABC foram de 20 a 70 A, incrementando 20 A à cada teste.

Em todos os cordões foram coletados os sinais elétricos, corrente e tensão. A partir destes dados é possível determinar potência, tempo de arco e de curto-circuito média, frequência de destacamento e a regularidade dos ciclos. A alta frequência de aquisição dos dados, 50 kHz, torna visível o ripple na onda de corrente.

4.2.1.1 Resultados e discussões

A Tabela 8, apresenta os resultados obtidos nos ensaios em que foi modificado o tempo de pulso de corrente na etapa de arco, parâmetro APT da fonte de soldagem MIG-AD. O ensaio em destaque na Tabela 8, onde o valor de APT foi definido como 3.0 ms é o ensaio utilizado como referência para todos os ensaios deste artigo.

Como esperado, o aumento do tempo da corrente de pulso provocou o aumento na corrente média e na tensão média, resultando em um significativo aumento da potência. Notavelmente, o tempo de arco e de curto-circuito não apresentaram correlação direta com o parâmetro APT. No entanto, o desvio padrão do tempo de arco e tempo de curto-circuito aumentou nos ensaios com APT de 4.0 e 5.0 ms, indicando que os períodos foram menos regulares.

Tabela 8 - Ensaio 1, alterando o valor do tempo de pulso no arco (APT)

| APT | Frequência de destacamento (Hz) | VA (m/min) | Potência (kW) | Corrente (A) | Tensão (V) | Tempo de arco (ms) | Tempo de curto (ms) |
|--------|---------------------------------|------------|---------------|--------------|------------|--------------------|---------------------|
| 1,0 ms | 69,9 | 1,85 | 1,25 | 97,6 | 11,65 | 8,2 ± 0,9 | 6,1 ± 1,2 |
| 2,0 ms | 65,0 | 1,97 | 1,48 | 105,3 | 11,87 | 8,8 ± 0,9 | 6,7 ± 1,3 |
| 3,0 ms | 68,5 | 2,35 | 1,83 | 114,9 | 12,5 | 8,7 ± 1,2 | 6,2 ± 1,4 |
| 4,0 ms | 69,7 | 2,70 | 2,02 | 124,0 | 12,7 | 8,4 ± 1,8 | 6,3 ± 2,2 |
| 5,0 ms | 73,6 | 2,80 | 2,22 | 132,8 | 12,9 | 7,6 ± 2,4 | 5,8 ± 2,9 |

Fonte: Autor.

A análise tem início com o ensaio de referência, no qual investiga-se os impactos sobre o processo de soldagem ao utilizar de uma onda de corrente de 200 A por 3.0 ms no momento da reabertura do arco. Dentre os resultados deste ensaio apresentados na Tabela 8, destaca-se os valores do desvio padrão para o tempo de arco e tempo de curto, ficando próximos a 1 ms, indicando alta repetitividade e estabilidade nos ciclos, o que é confirmado no oscilograma da Figura 57.

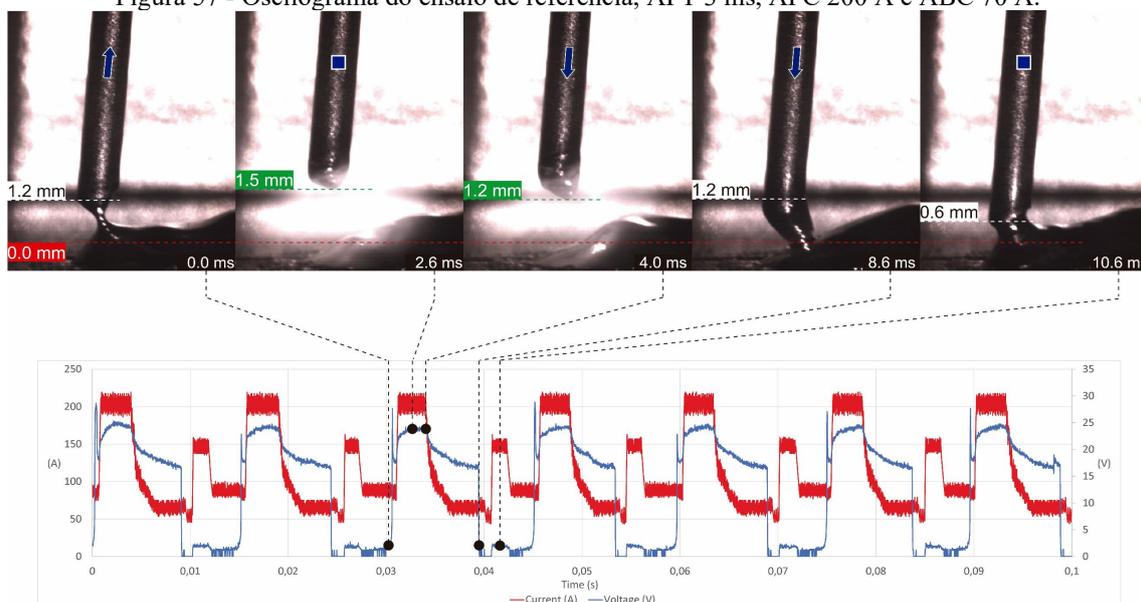
A Figura 57 apresenta junto ao oscilograma alguns frames em instantes importantes do processo que corroboram com os resultados apresentados na Tabela 8. O primeiro frame da Figura 57 apresenta a altura da linha de fusão entre arame e gota em relação a poça, 1.2 mm. A linha em vermelho, demarcado como 0.0 mm, representa o ponto onde a gota entra em contato com a poça, sendo este utilizado como referência as medições. O segundo frame indica a altura máxima do arame e gota, os quais atingem 1.5 mm no instante em que o arame está invertendo o movimento.

O instante 4.0 ms, terceiro frame, foi incluído na Figura 57 para avaliar o estado da gota no último momento antes de se encerrar o tempo do pulso de corrente no arco. Espera-se que a transferência metálica aconteça sempre por curto-circuito, ou seja, os parâmetros de pulso de corrente no arco não devem promover o destacamento da gota. O quarto frame, instante 8.6 ms indica o momento em que a gota atinge a poça. A altura da linha de fusão, que no instante em que ocorre o curto-circuito é de 1.2 mm, é reduzido para 0.6 mm até que o arame consiga parar o movimento de avanço, indicado no último frame, instante 10.6 ms. É importante que a altura da linha de fusão no momento quando ocorre o curto-circuito é importante para que o arame consiga parar o movimento de avanço antes que o arame sólido mergulhe na poça de fusão. A altura da linha de fusão de 0.6 mm no último frame unido a tensão superficial da poça permitiu que o pulso de corrente na etapa de curto-circuito desse início a estricção da ponte metálica, como fica evidente no último frame.

Utilizando um pulso de 200 A, com a duração de apenas 1.0 ms, o primeiro ensaio da Tabela 8 apresentou um valor de velocidade de arame média de 1.85 m/min, ficando com 0.5 m/min a menos do que o ensaio de referência. Na Figura 58 são apresentados os mesmos pontos do ensaio de referência, permitindo avaliar os efeitos do parâmetro APT na física da transferência metálica. A regularidade dos ciclos fica evidente tanto no oscilograma quanto no desvio padrão dos tempos de arco e de pulso. A redução do tempo

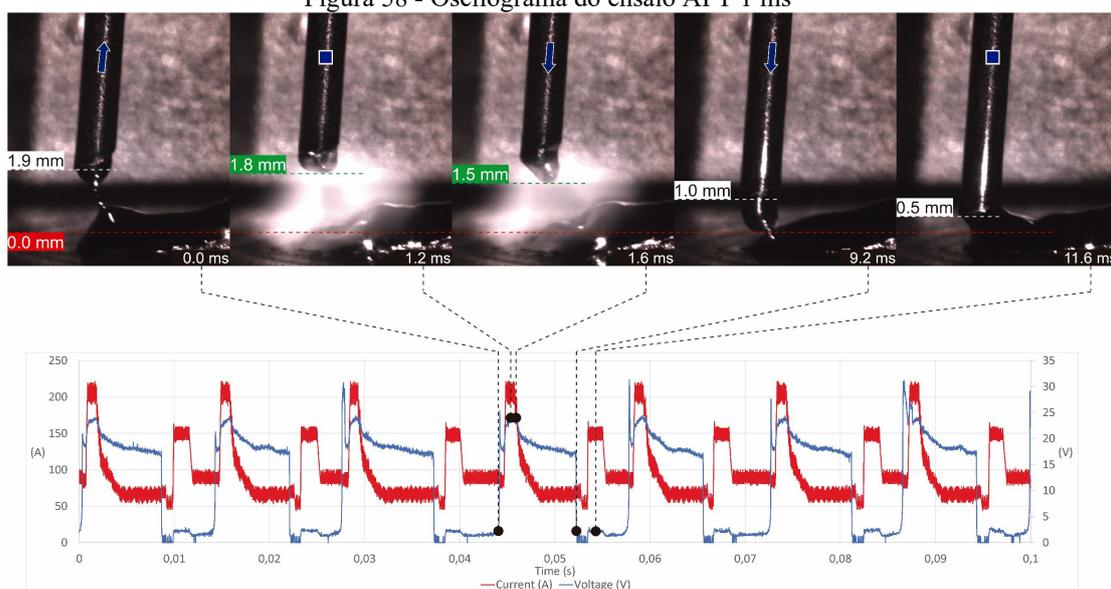
de pulso quando o arco está aberto afetou significativamente no volume da gota, a qual fica bem representada no terceiro frame, influenciando diretamente na altura da linha de fusão, no instante 9.2 ms. O resultado disso, atrelado a uma poça com uma tensão superficial maior, resultou na ineficiência do pulso de corrente na etapa de curto em iniciar a estricção da ponte metálica, como mostra o último frame da Figura 58. O efeito deste fenômeno fica claro na altura do arame necessária para que a ponte metálica seja rompida, 1.9 mm.

Figura 57 - Oscilograma do ensaio de referência, APT 3 ms, APC 200 A e ABC 70 A.



Fonte: Autor.

Figura 58 - Oscilograma do ensaio APT 1 ms



Fonte: Autor.

Os resultados apresentados pelos ensaios com o parâmetro APT em 1 ms e 3 ms, trazem consigo um resultado importante. O único parâmetro alterado entre estes dois ensaios foi o tempo de pulso no arco, permanecendo inalterada a taxa de redução da corrente, subsequente ao pulso, e o valor da corrente de base no arco (ABC). Ao compararmos o aumento da gota, do instante em que se encerra o pulso no arco até o momento do curto, em ambos os ensaios, fica evidente um aumento mais significativo no ensaio com APT em 3 ms. Essa constatação mostra que existe fusão de material durante a fase de corrente de base no arco, proveniente da energia fornecida pela corrente de pulso. A gota superaquecida fundiu material do arame mesmo após a corrente de pulso ser concluída. Essa afirmação não exclui a contribuição da corrente de base no arco para a fusão de arame.

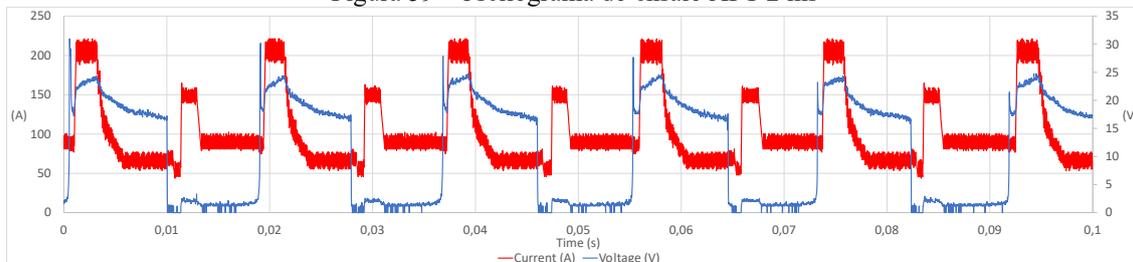
O segundo ensaio, no qual o valor de APT foi de 2 ms, é ilustrado pelo oscilograma da Figura 59. É possível ver como os períodos estão regulares, porém com um tempo de curto prolongado, resultando em uma frequência de destacamento de gotas de 65 Hz.

Ao utilizar o valor de 4 ms no parâmetro APT, foi constatado um aumento na irregularidade dos períodos, isso é confirmado ao observar o aumento do desvio padrão do tempo de arco e do tempo de curto. Não foi constatado o destacamento de gotas por voo livre ou burst. Conclui-se que a irregularidade do processo nestes casos deu-se pelo volume da poça. A deposição de gotas de grande volume com a velocidade de soldagem inalterada formou uma grande poça, o que é possível constatar ao comparar as imagens de alta velocidade dos ensaios com APT em 1 e 5 ms. Uma possível solução para este problema seria o aumento da velocidade de soldagem. O aumento da corrente de base no arco também poderia auxiliar afastando o excesso de material com a pressão do arco enquanto o arame se aproxima da poça. Outra alteração que poderia auxiliar no aumento da regularidade do processo seria o aumento da corrente de pulso no curto. Sendo estas três soluções apenas hipóteses baseadas em artigos correlatos.

O ensaio com o valor de APT em 5 ms tem seu oscilograma apresentado na Figura 61, acompanhando de alguns frames da filmagem de alta velocidade. Apesar da largura do pulso no arco ter ficado demasiadamente prolongada, não ocorreram destacamentos de gotas por voo livre. A energia utilizada no pulso na fase de arco contribuiu para o aumento da fusão de arame, mas a altura da linha de fusão entre o arame e a gota foi de

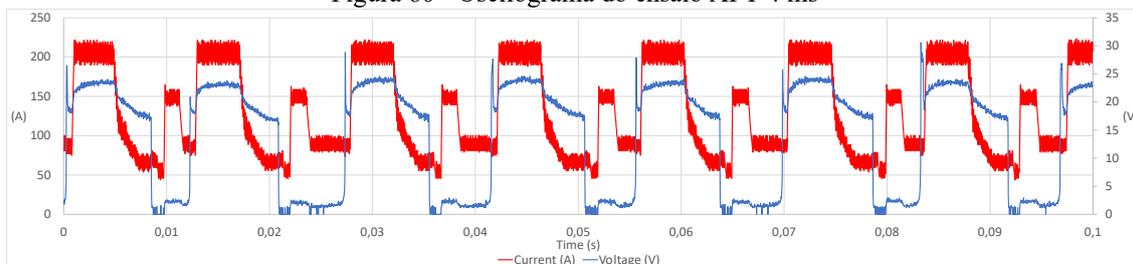
apenas 0.5 mm no instante 11.6 ms. A estricção da ponte metálica, apresentada no último frame da Figura 61, não fica evidente na filmagem de alta velocidade, indicando que para esta quantidade de energia na fase de arco seria necessário alterações em outros parâmetros do processo para buscar uma condição de estabilidade.

Figura 59 - Oscilograma do ensaio APT 2 ms



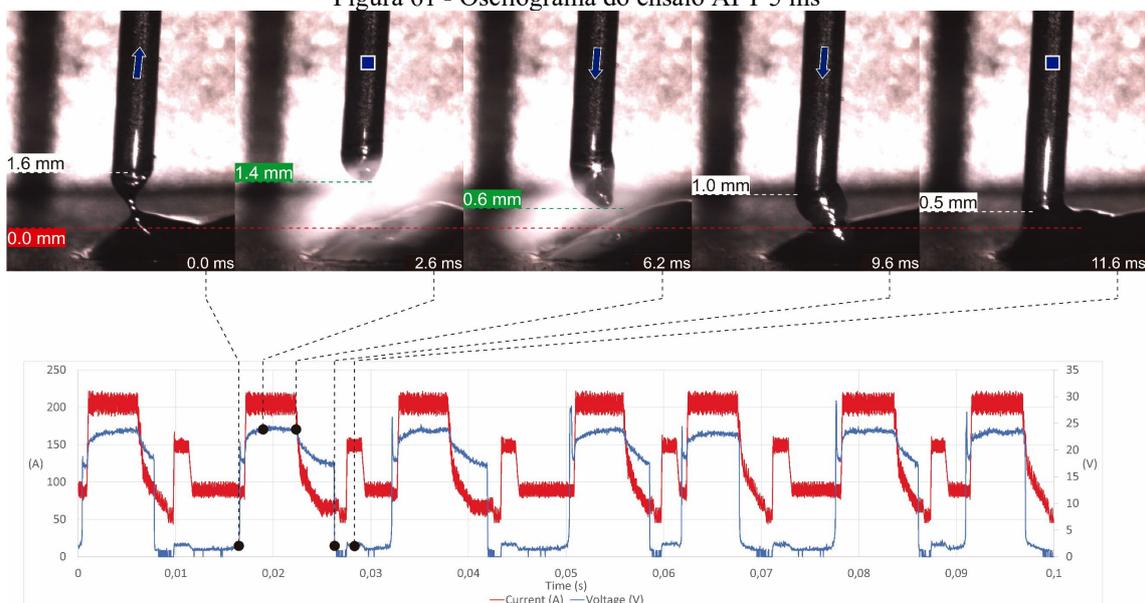
Fonte: Autor.

Figura 60 - Oscilograma do ensaio APT 4 ms



Fonte: Autor.

Figura 61 - Oscilograma do ensaio APT 5 ms



Fonte: Autor.

No ensaio 2 foi alterado o valor do parâmetro de corrente de pulso no arco (APC),

o qual está em detalhes na Tabela 9. O Ensaio em destaque com o valor de APC de 200 A é o mesmo ensaio de referência utilizado na Tabela 8. Os ensaios com 350 e 400 A, apresentaram muita instabilidade, de tal maneira que não foram repetidos 4 cordões para estes 2 parâmetros, devido a intensidade da instabilidade no momento da realização destes ensaios e, por esse motivo, não serão considerados nas conclusões.

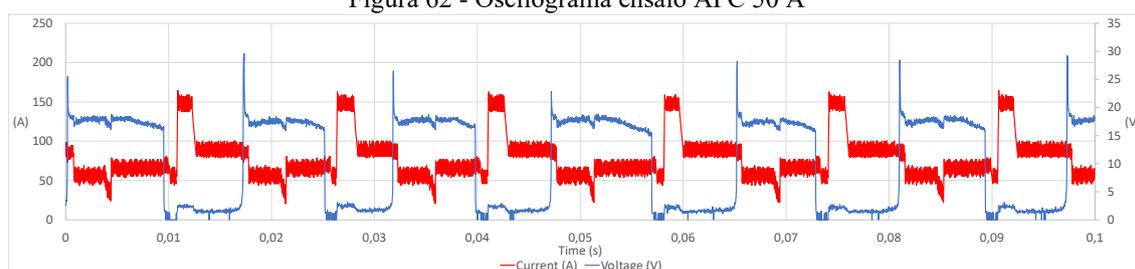
O ensaio com o parâmetro APC configurado em 50 A resultou em uma velocidade de arame de 1,2 m/min e uma potência de 0,7 kW, indicando que a redução da amplitude do pulso de corrente teve influência sobre a fusão de material. Apesar de ter apresentado pouca fusão de arame, o desvio padrão do tempo de arco e de tempo de curto indicam uma boa regularidade dos períodos, o que pode ser confirmado pelo oscilograma do mesmo ensaio na Figura 62.

Tabela 9 - Ensaio 2, alterando o valor da corrente de pulso no arco

| APC | Frequência de destacamento (Hz) | VA (m/min) | Potência (kW) | Corrente (A) | Tensão (V) | Tempo de arco (ms) | Tempo de curto (ms) |
|-------|---------------------------------|------------|---------------|--------------|------------|--------------------|---------------------|
| 50 A | 70,53 | 1,2 | 0,70 | 78,3 | 10,1 | 7,8 ± 1,0 | 6,6 ± 1,5 |
| 100 A | 73,8 | 1,5 | 1,00 | 90,5 | 11,2 | 7,8 ± 0,9 | 5,9 ± 1,1 |
| 150 A | 68,0 | 2,0 | 1,35 | 101,9 | 11,6 | 8,4 ± 1,2 | 6,4 ± 1,6 |
| 200 A | 68,5 | 2,4 | 1,83 | 114,9 | 12,5 | 8,7 ± 1,2 | 6,2 ± 1,4 |
| 250 A | 71,0 | 3,0 | 2,30 | 131,1 | 13,7 | 8,6 ± 1,3 | 5,7 ± 1,7 |
| 300 A | 64,9 | 3,5 | 2,70 | 140,6 | 14,3 | 9,5 ± 1,2 | 5,9 ± 2,2 |
| 350 A | 76,9 | 4,0 | 2,97 | 145,7 | 14,4 | 7,2 ± 3,0 | 5,2 ± 3,6 |
| 400 A | 68,2 | 4,2 | 3,59 | 160,2 | 15,6 | 8,9 ± 2,9 | 5,0 ± 2,6 |

Fonte: Autor.

Figura 62 - Oscilograma ensaio APC 50 A

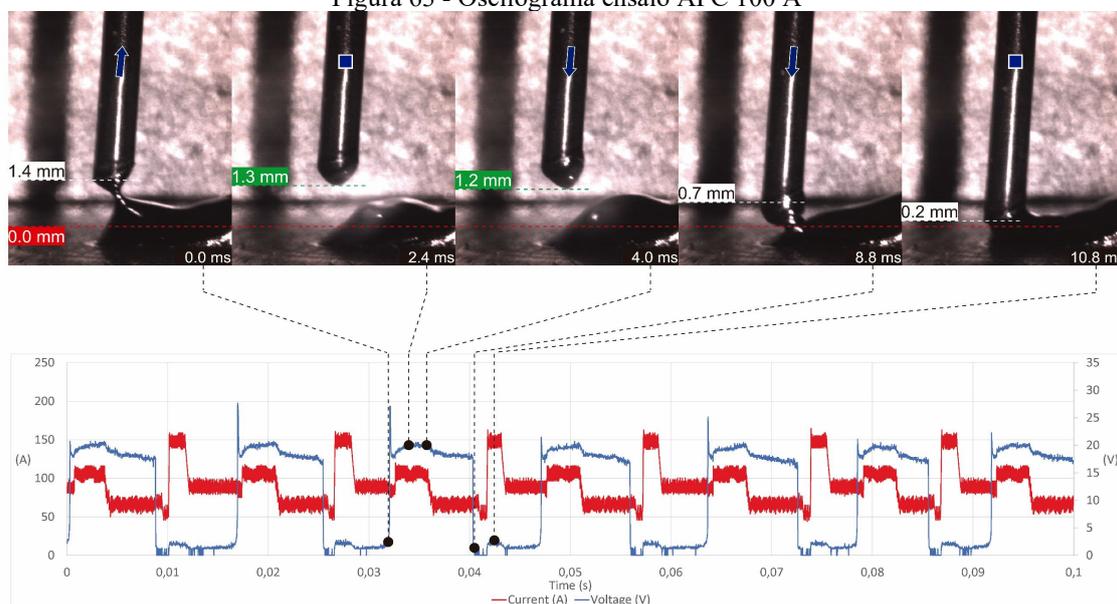


Fonte: Autor.

À medida que os valores de APC foram aumentados, a quantidade de arame requerida pelo processo seguiu aumentando, indicando que o ajuste na amplitude da corrente de pulso no arco possui grande influência sobre a velocidade de arame. A Figura 63 apresenta o oscilograma com alguns frames do ensaio para o APC de 100 A. A altura da linha de fusão no instante da ruptura foi de 1,4 mm, enquanto a altura máxima do

arame com a gota foi de 1,3 mm. O instante final do pulso da fase de arco é apresentado no instante 4 ms, onde é possível ver que a gota não sofre grandes deformações devido as forças de Lorentz. O resultado disso está registrado nos últimos dois frames, em que é possível ver que a porção sólida do arame teve que se aproximar mais para que ocorresse o curto-circuito entre a gota e a peça. Por consequência, no momento da reversão do movimento, a linha de fusão no arame ainda está muito próxima a poça. A proximidade do arame sólido à poça dificulta a estrição da ponte metálica que seria auxiliada pelo pulso de corrente na fase de curto-circuito.

Figura 63 - Oscilograma ensaio APC 100 A



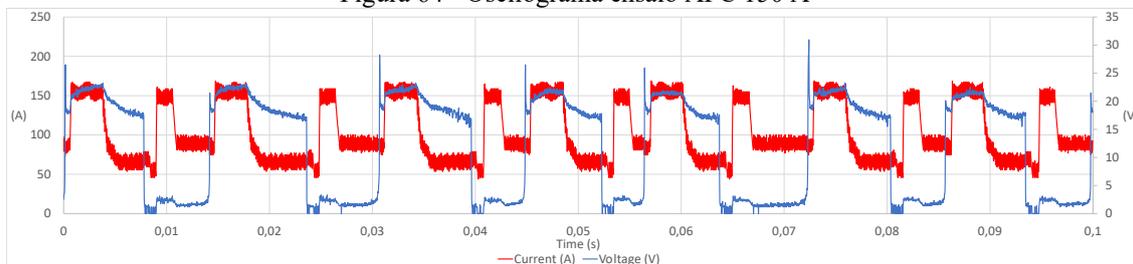
Fonte: Autor.

Ao aumentar o valor do APC para 150 A, o valor da velocidade média de arame subiu de 1,5 para 2 m/min, apesar da pequena redução da frequência de destacamento. A Figura 64 apresenta o oscilograma do ensaio.

O ensaio de referência, com o valor de APC em 200 A, obteve 2,4 m/min de velocidade de arame e está ilustrado na Figura 57. Ao comparar o ensaio com APC de 100 A com o de 200 A, pode-se constatar que o prolongamento da ponte metálica foi menor em 200 A e a altura da linha de fusão no momento do curto ficou mais alta, indicando uma gota maior, o que é confirmado pelo aumento da velocidade média de arame. A altura da linha de fusão no último frame dos dois ensaios ilustra como a estrição da ponte metálica no ensaio com APC de 200 A ficou mais evidente. Pode-se concluir a partir destas observações que uma gota maior permite o contato mais breve com a poça e

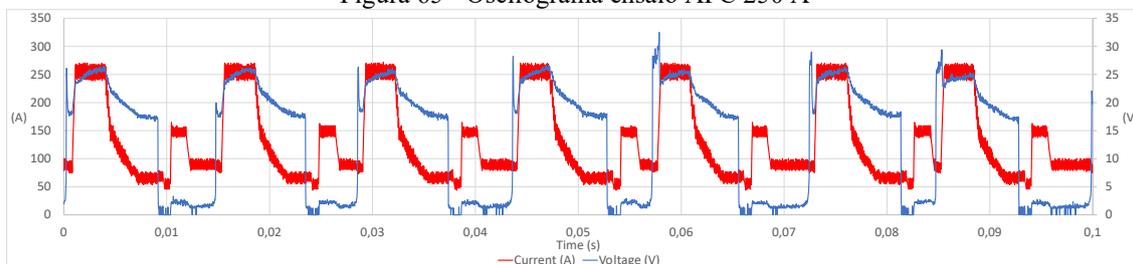
permite que o arame pare a uma distância maior da poça. Este fenômeno atrelado a redução da tensão superficial com o aumento da potência fornecida para a poça resultou em uma efetividade maior do pulso de corrente no curto-circuito.

Figura 64 - Oscilograma ensaio APC 150 A



Fonte: Autor.

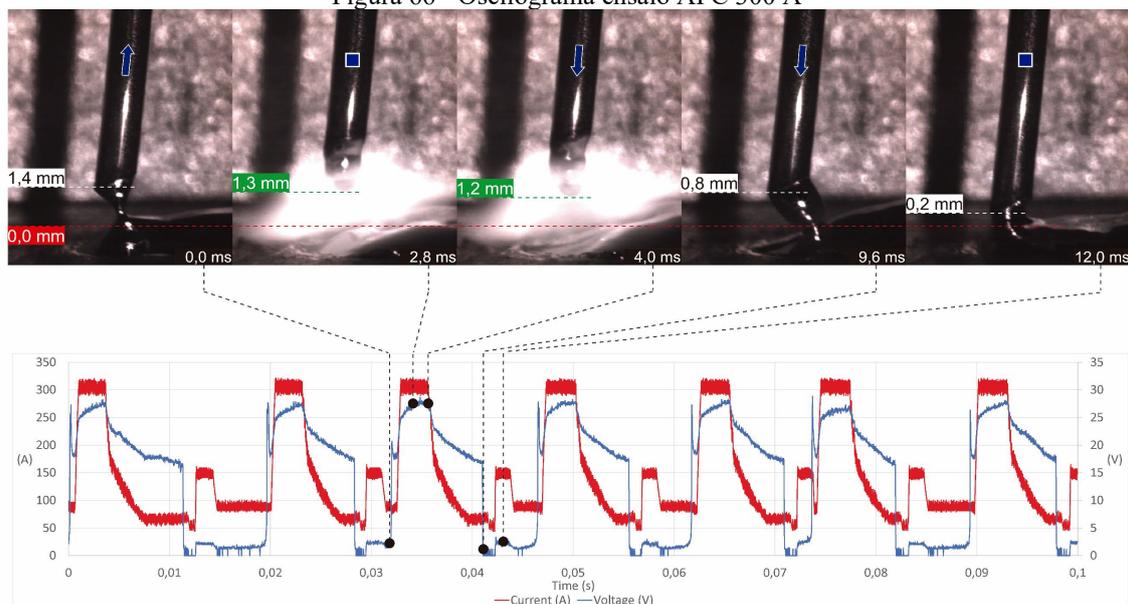
Figura 65 - Oscilograma ensaio APC 250 A



Fonte: Autor.

O ensaio com o valor de APC em 300 A apresentou um crescimento significativo no desvio padrão do tempo de curto, indicando períodos com mais e outros menos tempo de curto, enquanto o tempo de arco segue aumentando sem um crescimento no seu desvio padrão. Essa observação mostra que o aumento da amplitude do pulso na fase de arco permite um aumento da fusão de arame, contudo se não forem feitos outros ajustes nos parâmetros da onda de corrente, os tempos de curto-circuito vão variar, fazendo com que os períodos não fiquem estáveis. A Figura 66, mostra que a altura da ponte metálica antes do rompimento aumentou, se igualando ao ensaio com APC em 100 A. A altura máxima do arame reduziu para 1,3 mm. No instante 4 ms pode-se ver o efeito das forças de Lorentz em uma gota de grande volume. O momento em que a gota atinge a poça, instante 9,6 ms, verifica-se uma redução da altura da linha de fusão, em relação ao ensaio de referência. Isso também se confirma no último frame em que a altura da linha de fusão ficou em 0,2 mm.

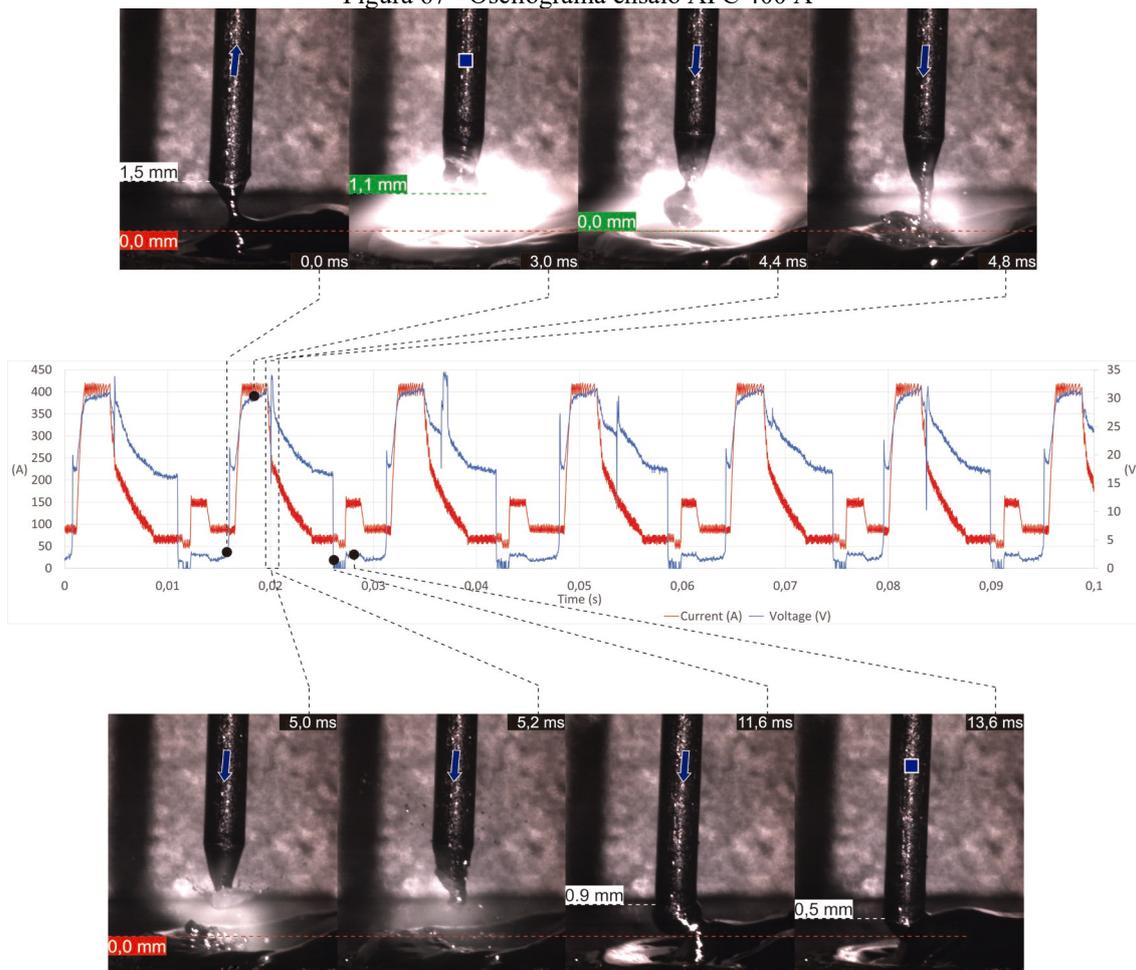
Figura 66 - Oscilograma ensaio APC 300 A



Fonte: Autor.

Por fim, conclui-se o ensaio do parâmetro APC com os registros dos testes em que APC foi configurado em 400 A. Como já mencionado a intensidade da instabilidade do processo impediu que fossem feitos 4 cordões nos ensaios em que o valor do parâmetro APT foi de 350 e 400 A. Apesar disso, realizou-se a filmagem de alta velocidade, o que permitiu constatar o motivo da instabilidade. A Figura 67 inicia pelo instante em que a ponte metálica está para ser rompida, seguida do momento em que o arame já está invertendo o movimento para iniciar o avanço, enquanto o pulso de corrente no arco está sendo aplicado. O instante 4,4 ms apresenta o estado do processo ao concluir o pulso de corrente, podendo-se constatar que a gota está em processo de ser destacada. Entre o quarto e sexto frame os tempos são muito próximos. Procurando não poluir o gráfico, foi utilizado um retângulo em torno da região que estes frames estão representados. O quinto e sexto frame, instantes 5 e 5,2 ms, mostram que após ter formado um alongamento do material fundido, a gota atingiu a poça. O nível de corrente próximo a 250 A aplicado a uma ponte metálica causou uma explosão da ponte metálica, causando respingos aparentes no instante 5,2 ms. O calor remanescente somado a energia aplicada até o instante 11,6 ms, momento em que o curto-circuito ocorre novamente, foi capaz de formar uma nova gota, permitindo manter uma altura da linha de fusão no momento da reversão do movimento, instante 13,6.

Figura 67 - Oscilograma ensaio APC 400 A



Fonte: Autor.

O último ensaio, em que se alterou apenas o valor da corrente de base no arco (ABC), é apresentado na Tabela 10. Os únicos parâmetros que seguiram uma tendência de crescimento foram a corrente, a tensão e por consequência a velocidade de arame obteve um aumento, porém pouco significativo.

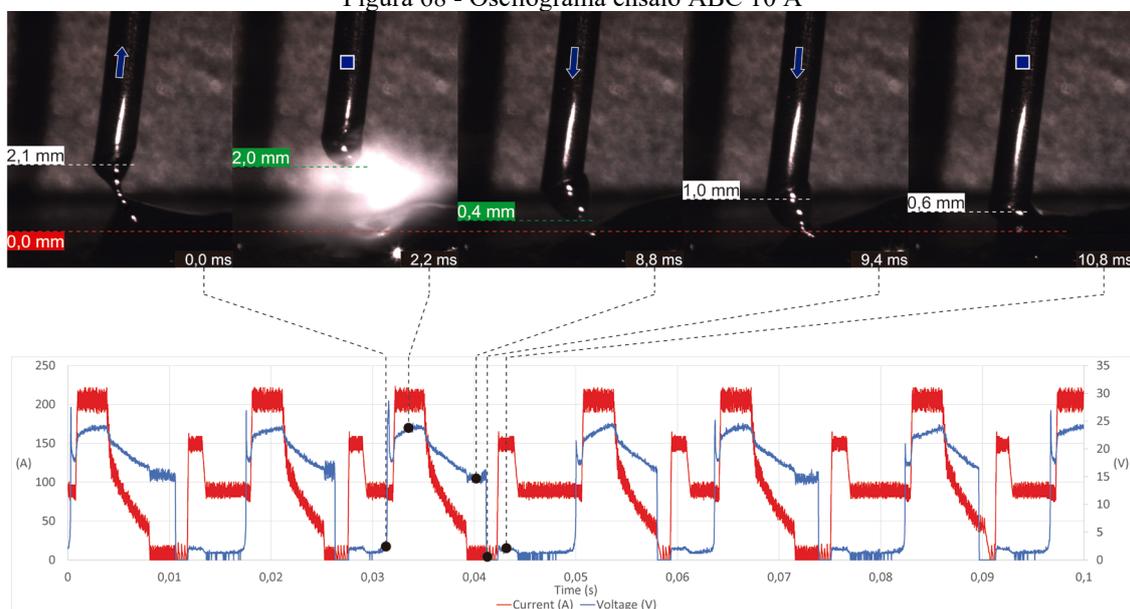
Tabela 10 - Ensaio 3, alterando o valor da corrente de base no arco

| ABC | Frequência de destacamento (Hz) | VA (m/min) | Potência (kW) | Corrente (A) | Tensão (V) | Tempo de arco (ms) | Tempo de curto (ms) |
|------|------------------------------------|---------------|------------------|-----------------|---------------|-----------------------|------------------------|
| 10 A | 66,6 | 2,17 | 1,76 | 104,8 | 12,0 | 8,7 ± 1,3 | 6,5 ± 1,6 |
| 30 A | 65,5 | 2,20 | 1,70 | 107,1 | 12,0 | 8,8 ± 1,2 | 6,7 ± 1,7 |
| 50 A | 64,9 | 2,31 | 1,71 | 109,2 | 12,2 | 8,9 ± 1,3 | 6,7 ± 1,5 |
| 70 A | 68,5 | 2,35 | 1,83 | 114,9 | 12,5 | 8,7 ± 1,2 | 6,2 ± 1,4 |

Fonte: Autor.

O oscilograma e os frames da Figura 68, referentes ao ensaio com o parâmetro ABC em 10 A, apresenta no terceiro frame, um momento diferente do apresentado nos ensaios anteriores. Neste é apresentado o momento em que está sendo aplicada a corrente de base no arco (ABC), com o objetivo de avaliar se os valores de corrente utilizados para ABC vão influenciar na forma da gota, desta forma algumas imagens e o oscilograma do ensaio de referência se repetem na Figura 69. Como já foi citado anteriormente, o tempo de duração do patamar da corrente de base no arco depende de diferentes fatores do processo. Buscou-se selecionar o frame que se encontra no tempo médio do patamar de ABC.

Figura 68 - Oscilograma ensaio ABC 10 A

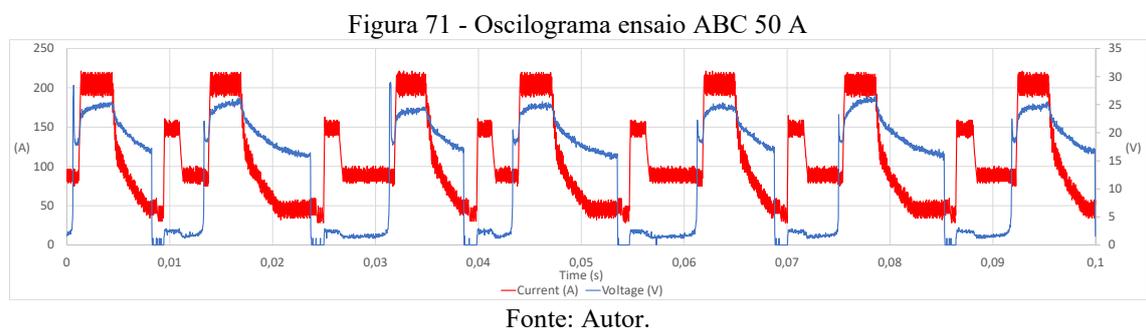
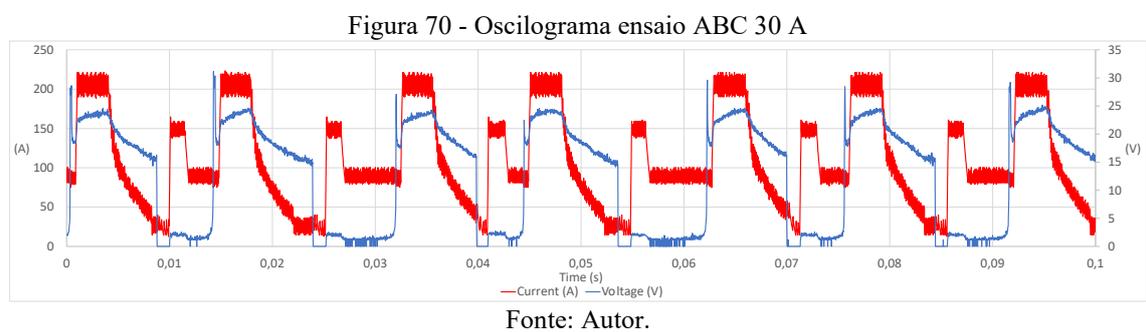
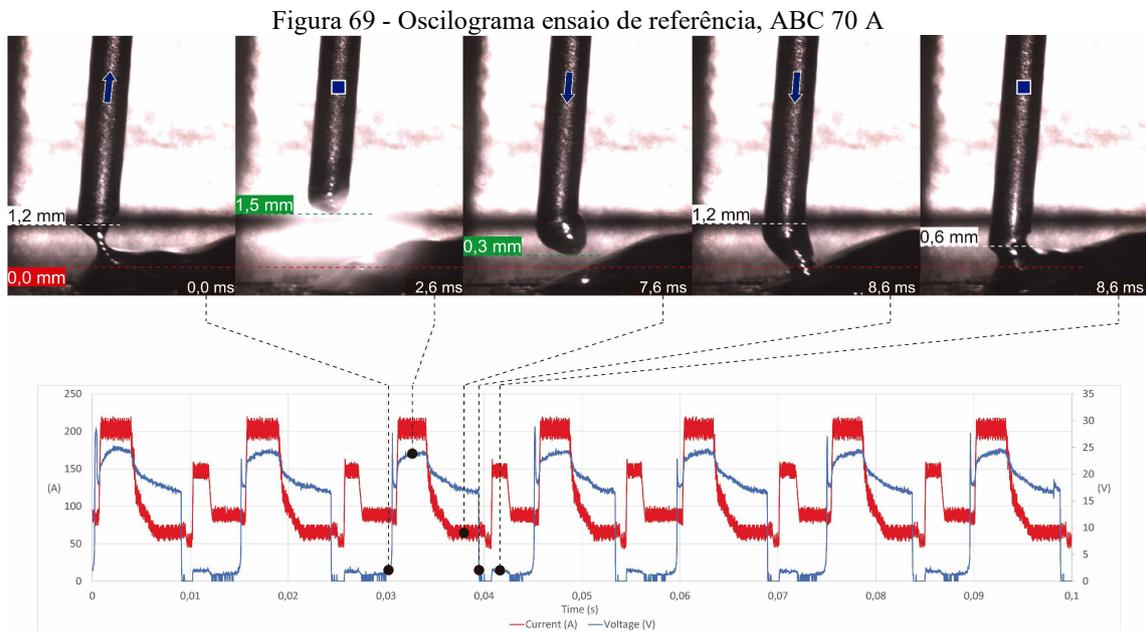


Fonte: Autor.

O primeiro frame da Figura 68 apresenta um aumento da altura da ponte metálica, seguido no instante 2.2 ms de uma altura de 2.0 ms, indicando um aumento da força da tensão superficial. Um dos fatores para tal resultado é a redução da energia fornecida a poça pela corrente de base no arco.

Os oscilogramas apresentados nas Figura 70 e Figura 71 mostram como não ocorreu significativa alteração do tempo médio dos períodos ao variar o valor de ABC. Contudo nota-se um aumento da regularidade do tempo de curto-circuito conforme se aumenta o valor de base no arco, como indicado também pelo desvio padrão do tempo de curto-circuito da Tabela 10. A explicação para isso pode vir da redução da energia fornecida a poça e pelo efeito que a pressão do arco, ao aproximar o arame da poça, causa na poça metálica, reduzindo a quantidade de material próxima ao arame no momento do

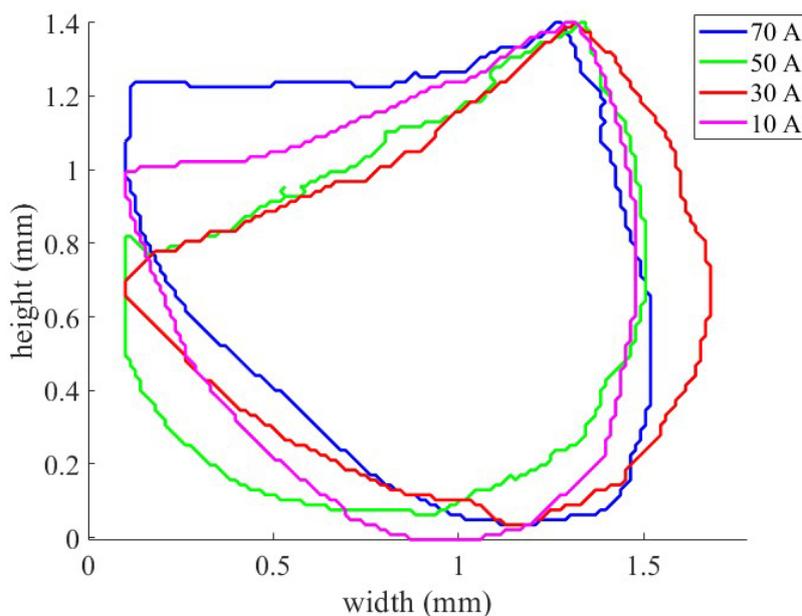
curto-circuito. Essa pressão do arco depende da corrente de base no arco para agir sobre a poça, reduzindo a altura do aço fundido.



A Figura 72 ilustra o contorno das gotas no instante anterior ao curto-circuito para este ensaio. As imagens das gotas foram processadas no Matlab e sobrepostas para uma melhor comparação. Apesar de haver alterações nas formas das gotas, a área foi calculada utilizando uma relação de pixels por milímetro do diâmetro do arame chegou-se nos

valores de 1,4, 1,2, 1,3 e 1,3 mm² de área para o ensaio com 70, 50, 30 e 10 A, respectivamente. Pode-se concluir que o valor de ABC não influenciou significativamente no tamanho das gotas, mas aumentou a potência média o que permitiu um aumento da velocidade média de arame por meio do aumento da frequência de destacamento.

Figura 72 - Contorno das gotas sobrepostas



Fonte: Autor.

4.2.1.2 Considerações

Este ensaio avaliou os fenômenos físicos da transferência metálica que envolvem três parâmetros de corrente da fase de arco da onda de corrente similar ao CMT convencional. A partir dos resultados apresentados é possível entender melhor a influência de cada parâmetro de corrente no processo.

Observou-se que a gota superaquecida retém uma quantidade de energia residual proveniente do pulso de corrente na fase de arco. Esta energia contribui de maneira significativa para a fusão do arame enquanto o processo já se encontra na etapa da corrente de base no arco.

Ao utilizar 1 e 2 ms no parâmetro APT, o processo apresentou pouca fusão de arame ao formar gotas menores na etapa de arco. Ao formar gotas menores o arame precisa se aproximar mais para depositar a gota na poça, resultando em uma aproximação maior do arame sólido da poça, dificultando a atuação do pulso no curto na estrição da

ponte metálica. Esse fenômeno atrelado a uma maior tensão superficial da poça de fusão, causada por uma redução da potência, exigiu que o arame se movesse até uma altura maior para romper a ponte metálica.

Utilizando uma amplitude de 200 A de pulso na fase de arco pode-se concluir que os valores de 4 e 5 ms para APT, reduziram a regularidade dos tempos de arco e de curto-circuito, indicando instabilidade. Esta instabilidade foi causada por um volume maior de material que não foi acompanhado de um aumento no pulso de corrente na fase de curto-circuito. A maior potência reduziu a tensão superficial, o que manteve a altura de arco similar ao ensaio com APT em 3 ms. Contudo a falta da efetividade do pulso de corrente no curto-circuito, devido ao maior volume das gotas, resultou em variação do tempo de execução dos ciclos.

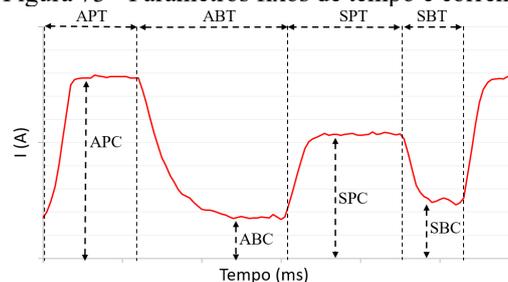
A amplitude do pulso de corrente na etapa de arco, parâmetro APT, está diretamente ligada à velocidade de arame média e a taxa de fusão de arame. O aumento da velocidade de arame seguiu uma tendência clara ao aumentar o patamar de corrente. Ao utilizar um pulso com largura de 3.0 ms, a corrente máxima que permitiu um processo regular foi de 300 A.

Os diferentes patamares de ABC avaliados obtiveram pouca variação nos resultados, podendo concluir que o aumento do valor de ABC pode aumentar a velocidade de arame com mais energia sendo aplicada na fase de arco, porém, pouco significativa.

4.2.2 Análise do efeito do pulso de corrente na fase de curto-circuito sobre a transferência metálica

Neste ensaio, serão apresentados os efeitos do pulso no curto-circuito sobre a transferência metálica. Especificamente, serão alterados o tempo e a amplitude do pulso durante a fase de curto-circuito, como representado na Figura 73. Quando definido o valor de tempo de pulso no curto (APT) como zero, o valor de corrente atribuído será o valor de corrente de base no curto (ABC), podendo assim avaliar como o processo se comporta sem o pulso no curto.

Figura 73 - Parâmetros fixos de tempo e corrente.



| Parameters | |
|------------------------------------------|------------------|
| Tempo de pulso no arco (APT) | 3 ms |
| Corrente de pulso no arco (APC) | 190 A |
| Tempo de base no arco (ABT) | Não configurável |
| Corrente de base no arco (ABC) | 90 A |
| Tempo de base no curto-circuito (SBT) | Não configurável |
| Corrente de base no curto-circuito (SBC) | 70 A |

Fonte: Autor.

O valor de corrente de base no curto (SBC), o qual corresponde ao patamar de corrente que precede a abertura de arco, tem um valor reduzido para evitar respingos. Já o tempo em que este valor de corrente de base (SBT) é empregado depende da reabertura do arco, o qual está intimamente ligado a tensão superficial, efeito Pinch e com a velocidade de recuo do arame.

A aplicação de uma fonte totalmente flexível permitirá avaliar com precisão os efeitos individuais de cada parâmetro da onda de corrente e do motor responsável pelo movimento do arame. Possibilitando, neste trabalho, analisar a influência do pulso de corrente, na fase de curto-circuito, no perfil da solda, na estabilidade do processo e na taxa de deposição de gotas.

Apesar dos dados a seguir já terem sido mencionados anteriormente, serão novamente apresentado, além da descrição dos equipamentos e materiais utilizados. Um manipulador linear automático de 1 eixo de liberdade da empresa SPS Soldagem, Figura 55, foi utilizado para controlar a velocidade de soldagem.

A forma de onda de corrente utilizada com a descrição simplificada do controle do arame é apresentado na Figura 56. A chapa utilizada para deposição do cordão mede aproximadamente 76 x 206 mm com largura de 12,7 mm. O material da chapa escolhida foi o aço ao carbono ASTM A36. O arame escolhido foi o ER70S-6, com 1,2 mm de diâmetro. Para o gás de processo foi utilizado uma mistura de 8% CO₂ e 92% Argônio, com uma vazão de 15 l/min. O ensaio consistiu na deposição de 4 cordões, com o comprimento de 60 mm, na posição plana. Os cordões não foram depositados sequencialmente, sendo limpa a superfície da chapa antes da deposição de cada cordão.

É importante destacar que, neste teste, não será utilizada a velocidade de arame média (VA), como um parâmetro de entrada, como usualmente se configura em fontes comerciais, como o CMT. Isso se deve ao fato de que a VA, em variantes com alimentação dinâmica, é resultado de um conjunto de fatores do processo, previamente testados pelos fabricantes. Estes conjuntos de parâmetros são salvos em arquivos internos da fonte, conhecidos comercialmente como programas sinérgicos. O foco deste trabalho não é criar um programa para determinar a VA, mas sim compreender o impacto da energia aplicada pelo pulso no curto-circuito sobre a transferência metálica. Portanto, a VA será um dos resultados que podem variar em função dos testes realizados e será mensurada a partir da linearização da curva de deslocamento do motor. A aceleração do servomotor foi configurada em 300 m/s^2 .

O primeiro parâmetro que será analisado será o tempo de pulso na etapa de curto-circuito. Posteriormente, este parâmetro será fixado em 1,5 ms, enquanto a amplitude do pulso será alterada. Permitindo, assim, constatar a influência do pulso no curto na transferência metálica. Ressalta-se que o firmware da fonte de solda não fará alterações de parâmetros ao longo do cordão de solda, permitindo constatar quaisquer influências, inclusive a manifestação de instabilidades.

Os testes foram divididos em dois ensaios.

- Iniciando com a análise do tempo de pulso no curto (SPT) para o arame ER70S-6. Para este primeiro ensaio o valor de corrente no pulso no curto (SPC), foi de 150 A, enquanto o valor para SPT foi de 0 a 3 ms, incrementando 0,5 ms por vez.
- Utilizando o mesmo arame, o valor de SPT foi fixado em 1,5 ms. Já o valor de SPC, variou entre 100 e 200 A, incrementando 25 A pôr vez.

Com base no processamento dos sinais elétricos, foram coletados valores médios e instantâneos de corrente, tensão e potência, tanto de maneira global quanto de forma isolada, especificamente durante as fases de curto-circuito e arco. Também foram registrados o tempo de arco, tempo de curto-circuito e frequência de destacamento.

A metodologia adotada para analisar a filmagem de alta velocidade consistiu em definir o ponto em que a gota toca a poça de fusão, instante exato do curto-circuito, como referência. A partir desse ponto, mensurou-se a altura da gota e da linha de fusão do arame. Nas imagens em que o arco elétrico dificultou a visualização do arame, foi aplicado, no pós-tratamento das imagens, um filtro azul na região arco.

Por fim, para a análise geométrica dos cordões, foram utilizadas as imagens das macrografias para mensurar a altura, largura, penetração, ângulo de molhabilidade e taxa de diluição.

A combinação dos resultados obtidos pelos diferentes sistemas de aquisição permite uma ampla visão sobre os fenômenos físicos presentes na transferência metálica.

4.2.2.1 Resultados e discussões

A Tabela 8 apresenta os resultados obtidos no Ensaio 1, no qual foi modificado o tempo de pulso de corrente na etapa de curto-circuito, parâmetro SPT. É importante ressaltar que ao definir o tempo de pulso igual a 0,0 ms a fonte não executa o pulso de corrente na etapa de curto-circuito.

Tabela 11 - Ensaio 1, alterando o valor do tempo de pulso no curto

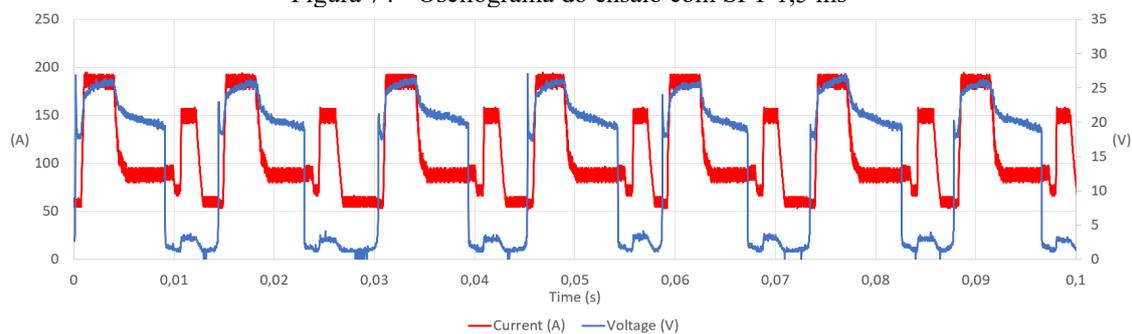
| SPT | Frequência de destacamento (Hz) | VA (m/min) | Potência (kW) | Corrente (A) | Tensão (V) | Tempo de arco (ms) | Tempo de curto (ms) |
|--------|---------------------------------|------------|---------------|--------------|------------|--------------------|---------------------|
| 0.0 ms | 62,5 | 2,11 | 167 | 102,9 | 12,8 | 10,0 ± 1,6 | 6,0 ± 1,5 |
| 0.5 ms | 63,7 | 2,24 | 1,67 | 105,9 | 12,7 | 9,8 ± 1,7 | 5,9 ± 1,5 |
| 1.0 ms | 62,9 | 2,20 | 1,58 | 108,9 | 11,6 | 9,0 ± 1,5 | 6,9 ± 1,5 |
| 1.5 ms | 63,7 | 2,24 | 1,60 | 110,8 | 11,8 | 9,0 ± 1,5 | 6,7 ± 1,5 |
| 2.0 ms | 64,5 | 2,26 | 1,59 | 113,3 | 11,9 | 8,9 ± 1,5 | 6,6 ± 1,7 |
| 2.5 ms | 64,9 | 2,39 | 1,63 | 116,8 | 11,9 | 8,9 ± 1,4 | 6,5 ± 1,8 |
| 3,0 ms | 64,1 | 2,31 | 1,61 | 117,2 | 12,0 | 9,0 ± 1,6 | 6,6 ± 1,9 |

Fonte: Autor.

O ensaio com SPT em 1,5 ms, em destaque na Tabela 8, foi obtido em testes exploratórios e inicialmente definido como referência, pois resultou em um processo estável e repetitivo, ficando evidente ao avaliar a regularidade dos períodos no oscilograma, Figura 74 .

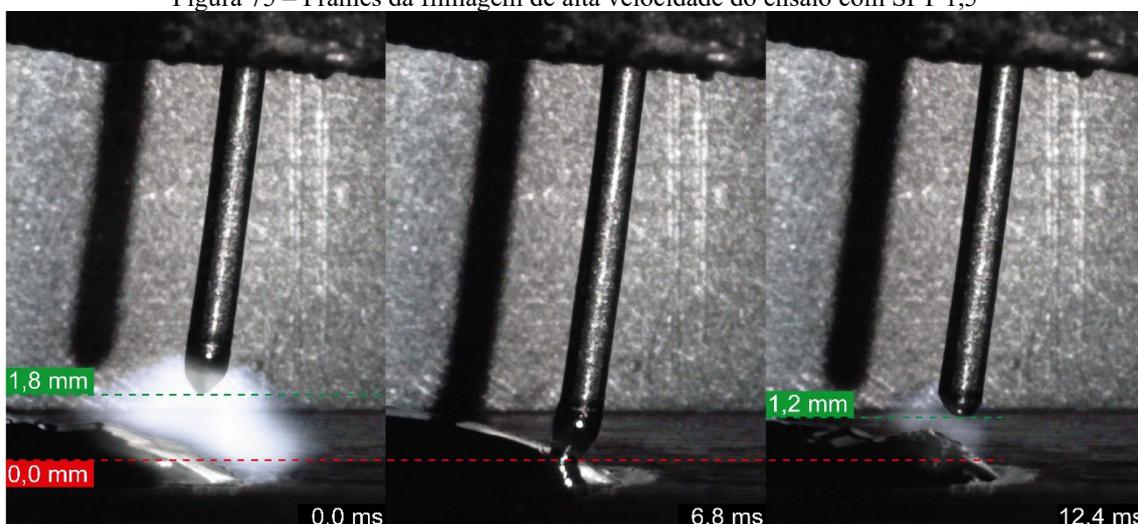
A Figura 75 apresenta 3 frames obtidos na filmagem de alta velocidade, os quais apresentam momentos cruciais para a análise do pulso de corrente no curto-circuito. O primeiro frame o qual apresenta o instante em que o arame atinge a sua altura máxima em relação a poça, 1,8 mm. O segundo frame marca o ponto de referência para as medições, o instante em que a gota atinge a poça de fusão. O último frame é o momento exato em que a ponte metálica rompe, a 1,2 mm de altura do ponto de referência.

Figura 74 - Oscilograma do ensaio com SPT 1,5 ms



Fonte: Autor.

Figura 75 – Frames da filmagem de alta velocidade do ensaio com SPT 1,5



Fonte: Autor.

O ensaio sem pulso de corrente na etapa de curto-circuito, em evidência no oscilograma da Figura 76, obteve uma menor frequência de destacamento, com 62,5 Hz. A velocidade de soldagem foi de 2,11 m/min e a corrente média de apenas 102,9 A. A tensão média de 12,8 V, apresentou 1 V a mais do que o ensaio de referência, sendo este é um dos indícios do motivo pelo qual os valores de velocidade e frequência de destacamento diminuíram. A ausência do pulso de corrente na etapa de curto-circuito fez com que fosse necessário um maior alongamento da ponte metálica para a abertura do arco, fenômeno registrado na Figura 77.

O primeiro frame da Figura 77 é o momento em que o arame atingiu a sua maior distância em relação a poça, 2,3 mm, e ele está parado enquanto o motor inverte o movimento do arame, para iniciar o avanço em direção a poça. Um aumento de 22 % na altura do arame em relação ao ensaio de referência. O instante 7,4 ms, segundo frame, é

o instante exato em que o arame entra em contato com a poça, causando o curto-circuito. Em seguida, no instante 14,2 ms, o terceiro frame apresenta a distância entre o arame e a poça no momento do rompimento da ponte metálica, de 1,8 mm. A altura do arame, no momento do rompimento para o ensaio sem pulso de corrente, foi igual a altura máxima no ensaio com o pulso de 1,5 ms.

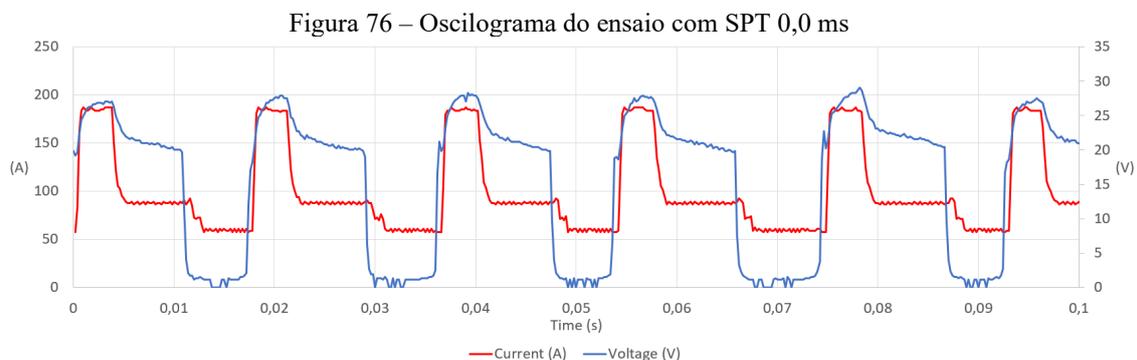
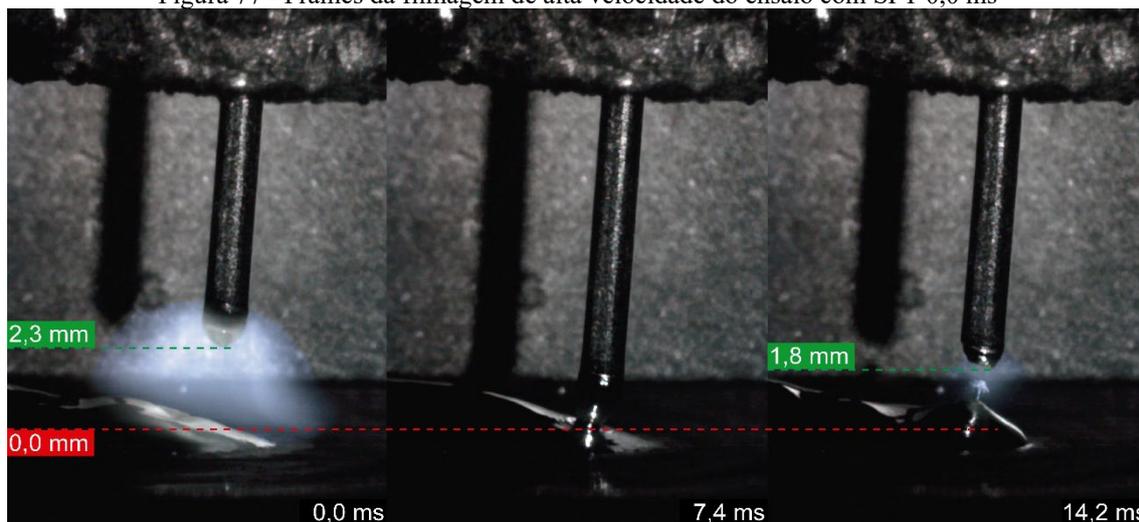


Figura 77 - Frames da filmagem de alta velocidade do ensaio com SPT 0,0 ms



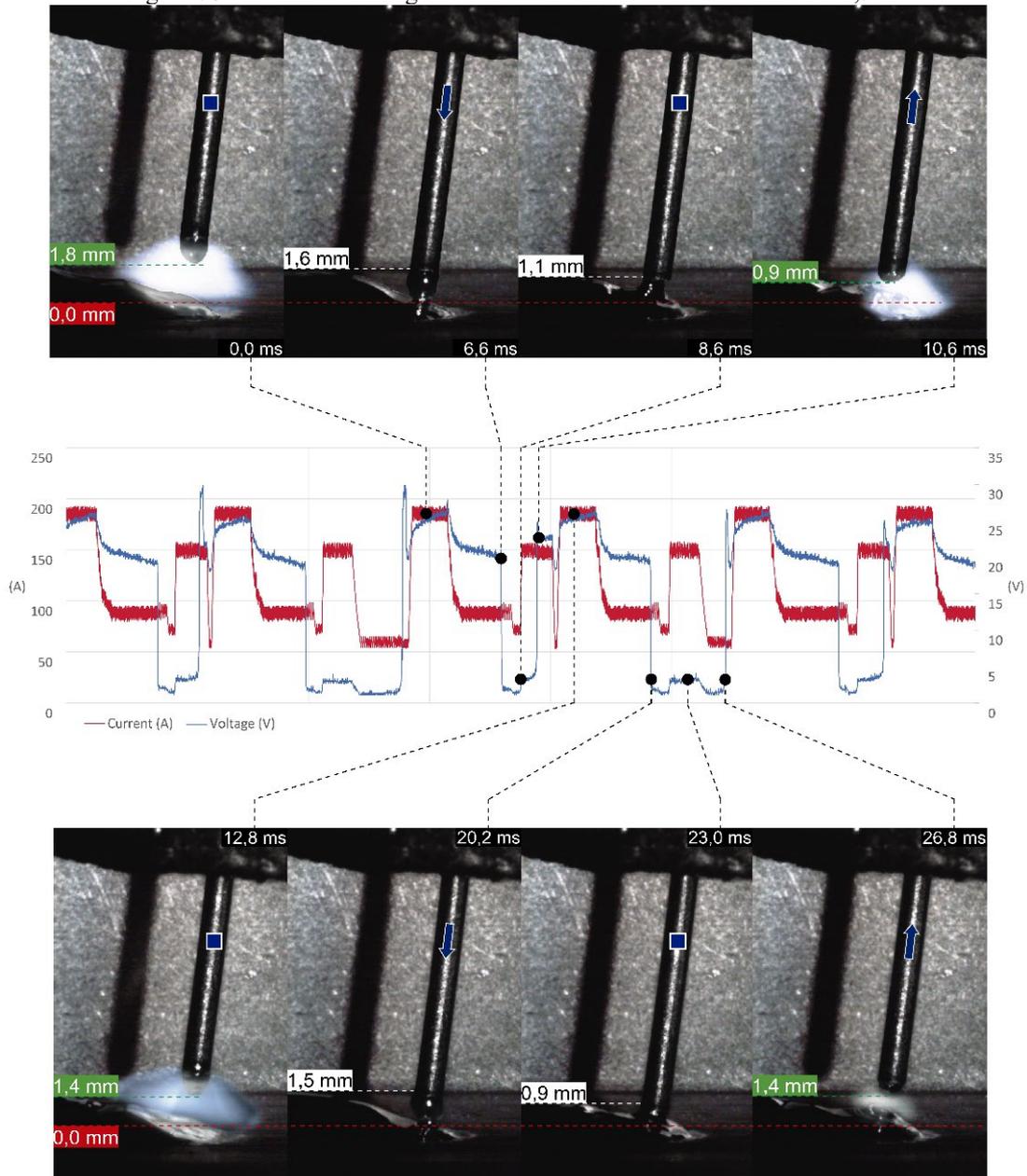
Fonte: Autor.

Ao incluir o pulso no curto, configurando o parâmetro SPT em 0,5 ms, permitiu-se constatar um aumento da frequência de destacamento e de velocidade de arame, por consequência, o tempo de arco e o tempo de curto tiveram seu valor médio reduzidos. Foi possível constatar ao longo das filmagens que os períodos não estão seguindo a regularidade desejada, isso deve-se ao fato de que em alguns períodos o pulso no curto é suficiente para auxiliar na estricção da ponte metálica, mas em outros não causa a ação necessária. Isso se intensificou no ensaio com o valor de SPT em 1,0 ms.

O ensaio com SPT de 2,0 ms apresentou uma continuidade na tendência do aumento da frequência de destacamento. Foi possível verificar na filmagem de alta velocidade que em eventuais períodos ocorrem uma abertura prematura do arco seguido por um período mais prolongado. Este efeito se intensifica no ensaio com SPT de 2,5 ms e será mais bem explicado a seguir.

A Figura 78 apresenta alguns dos frames obtidos na filmagem de alta velocidade do ensaio com STP configurado em 2,5 ms. Observa-se no processo uma repetição cíclica: após um período com o tempo de curto-circuito reduzido, em destaque nas quatro primeiras imagens da Figura 78, há um período com um tempo de curto-circuito prolongado, em evidência nas quatro últimas imagens da Figura 78. Este efeito se deve ao excesso de tempo de pulso no curto-circuito. Muito tempo de pulso no curto causa um rompimento precoce da ponte metálica, Figura 78, instante 10,6 ms. Em seguida o arco é aberto a uma altura reduzida, como pode-se ver no instante 12,8 ms da Figura 78, o qual apresenta uma altura de 1,4 mm, sendo 0,4 mm a menos do que o instante 0,0 ms da Figura 78. Esta redução resulta em um valor da tensão menor, pois a altura do arco é reduzida, que por sua vez reduz a potência. Essa redução da potência irá resultar em um volume de gota ligeiramente menor. Para compensar essa redução da gota, o arame precisa avançar mais, aproximando também a linha de fusão do arame da poça líquida, como evidenciado na Figura 78 ao compararmos os instantes 6,6 e 20,2 ms. Ao detectar o curto-circuito o arame irá iniciar o movimento de parada, contudo, até a parada completa do arame, o mesmo avançará um pouco em direção a poça mantendo a linha de fusão do arame mais próximo da poça, instante 23,0 ms da Figura 78. Quando o pulso no curto-circuito é aplicado nesta situação, a proximidade da linha de fusão à poça impede o início adequado da estrição da ponte metálica. Isso força o arame a recuar mais para que consiga romper a ponte metálica, levando à formação de um arco mais alto e, conseqüentemente, formará uma gota de maior volume. Esta dinâmica estabelece um ciclo que continua se repetindo.

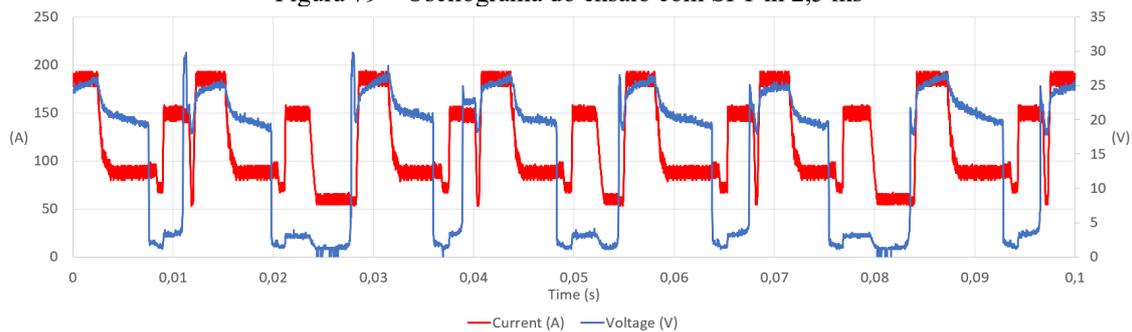
Figura 78 - Frames da filmagem de alta velocidade do ensaio com SPT 2,5 ms



Fonte: Autor.

Neste ensaio o efeito detalhado pela Figura 78, se repetiu com muita regularidade, como também é possível visualizar na Figura 10. Por ter encontrado uma condição de repetitividade alta o fenômeno foi nomeado como "Effect of Excess Energy in Current Pulse During Short-Circuit Stage".

Figura 79 – Oscilograma do ensaio com SPT in 2,5 ms



Fonte: Autor.

O ensaio com SPT em 3,0 ms foi ainda mais afetado pelo Effect of Excess Energy in Current Pulse During Short-Circuit Stage, ficando evidente ao comparar o seu desvio padrão do tempo de curto aos demais ensaios. Outra consequência da instabilidade foi a redução da velocidade de arame. Por conta da instabilidade do ensaio com SPT em 3,0 ms, não foi realizada a sua macrografia.

A Tabela 2 apresenta os resultados das macrografias do ensaio 1. É possível observar que a largura e a altura são condizentes com a velocidade de arame, já a penetração e a diluição foram menores ao não utilizar o pulso no curto. O perfil dos cordões manteve um formato similar como é possível visualizar na Figura 80.

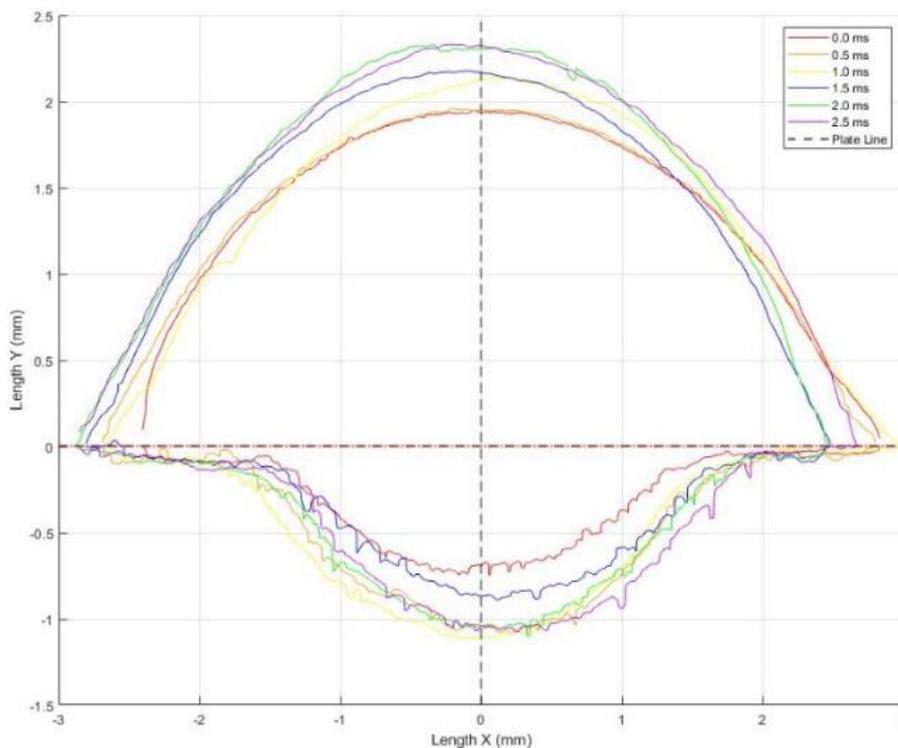
Para o segundo ensaio o valor de SPT foi fixado em 1,5 ms, enquanto a amplitude do pulso (SPC) foi alterada de 100 a 200 A. O objetivo seria analisar a influência de SPC no processo e no cordão de solda. O ensaio utilizado como referência anteriormente, em que o valor de SPT foi de 1,5 ms e SPC de 150 A, continua sendo a referência para este ensaio e está em destaque na Tabela 13.

Tabela 12 - Ensaio 1, resultado das medições das macros.

| SPT | VA (m/min) | Largura (mm) | Altura (mm) | Ângulo de molhabilidade | Reforço (mm) | Penetração (mm) | Diluição |
|--------|---------------|-----------------|----------------|----------------------------|-----------------|--------------------|----------|
| 0,0 ms | 2,11 | 5,24 | 1,95 | 54,71 | 7,34 | 0,75 | 17,77 |
| 0,5 ms | 2,24 | 5,48 | 1,96 | 54,74 | 7,49 | 1,09 | 25,55 |
| 1,0 ms | 2,20 | 5,66 | 2,14 | 53,78 | 7,81 | 1,12 | 25,53 |
| 1,5 ms | 2,24 | 5,29 | 2,18 | 58,00 | 7,95 | 0,90 | 20,25 |
| 2,0 ms | 2,26 | 5,34 | 2,33 | 55,23 | 8,58 | 1,10 | 22,76 |
| 2,5 ms | 2,39 | 5,52 | 2,33 | 56,40 | 8,85 | 1,08 | 22,75 |

Fonte: Autor.

Figura 80 - Perfil das macros do ensaio 1



Fonte: Autor.

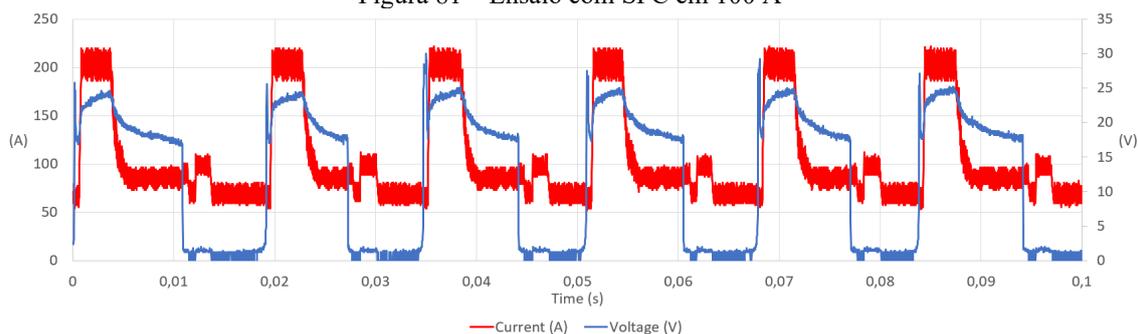
Tabela 13 - Ensaio 2, variando a amplitude da corrente de pulso no curto com um período de 1,5 ms.

| SPC | Frequência de destacamento (Hz) | VA (m/min) | Potência (kW) | Corrente (A) | Tensão (V) | Tempo de arco (ms) | Tempo de curto (ms) |
|-------|------------------------------------|---------------|------------------|-----------------|---------------|-----------------------|------------------------|
| 100 A | 61,7 | 2,12 | 1,56 | 100,2 | 10,7 | 9,1 ± 1,3 | 7,1 ± 1,4 |
| 125 A | 61,0 | 2,12 | 1,53 | 107,3 | 11,5 | 9,3 ± 1,1 | 7,1 ± 1,3 |
| 150 A | 63,7 | 2,21 | 1,60 | 110,8 | 11,8 | 9,0 ± 1,5 | 6,7 ± 1,5 |
| 175 A | 64,9 | 2,39 | 1,62 | 114,7 | 11,7 | 8,8 ± 1,6 | 6,6 ± 1,8 |
| 200 A | 65,8 | 2,46 | 1,64 | 118,1 | 12,0 | 8,7 ± 1,7 | 6,5 ± 1,9 |

Fonte: Autor.

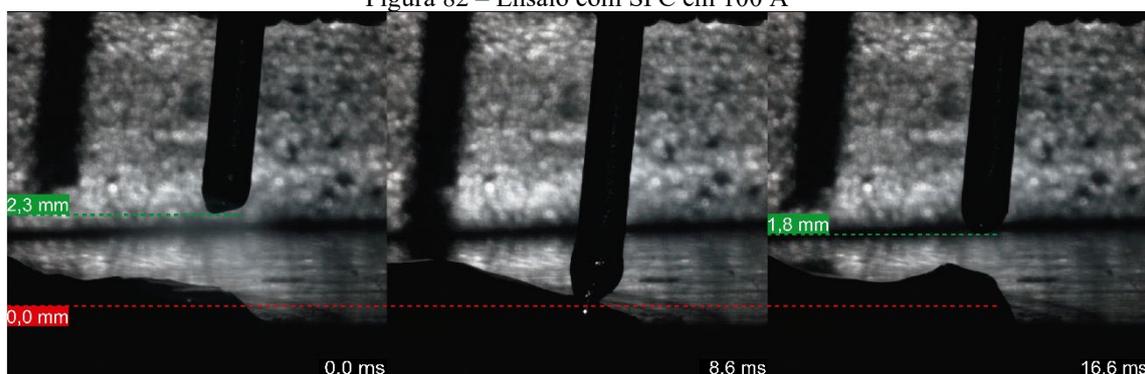
Ao utilizar o valor de 100 A a frequência foi de 61,7 Hz enquanto a velocidade de arame média foi de 2,12 m/min. A Figura 81 apresenta o oscilograma referente ao ensaio com o valor de SPC em 100 A, o qual apresenta uma boa regularidade dos períodos. A Figura 82 apresenta no instante 0,0 ms, momento em que está ocorrendo o pulso no arco e o arame se encontra na sua altura máxima em relação a poça. No instante 16,6 ms é possível ver o momento exato em que a ponte metálica se rompe, a uma altura de 1,8 mm.

Figura 81 – Ensaio com SPC em 100 A



Fonte: Autor.

Figura 82 – Ensaio com SPC em 100 A

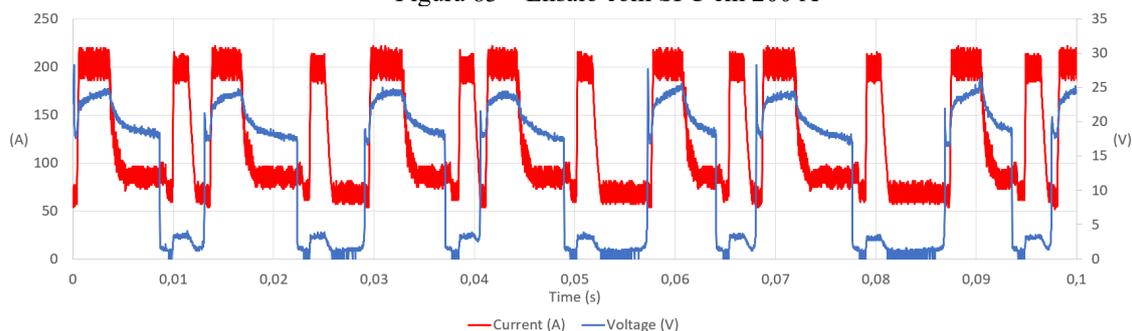


Fonte: Autor.

O ensaio com SPC em 125 A não obteve alterações significativas quando comparado com o ensaio com SPC em 100 A. O fato de a frequência de destacamento ter reduzido, foi devido ao aumento do tempo de arco. Os ensaios seguintes com 150, 175 e 200 A apresentaram um aumento gradual da frequência de destacamento e da velocidade de arame, por consequência o tempo de arco e de curto reduziram. Ao analisarmos o desvio padrão nota-se que ele obteve um crescimento, o que representa uma maior variação na duração dos períodos.

O oscilograma do ensaio com o valor de SPC em 200 A é apresentado na Figura 83, em que é possível constatar que a frequência dos períodos aumentou, contudo, a regularidade dos mesmos reduziu. Ao avaliar as imagens de alta velocidade é possível afirmar que a altura do arame no momento do pulso de corrente no arco e no momento do rompimento da ponte metálica reduziram, como está em evidência na Figura 84.

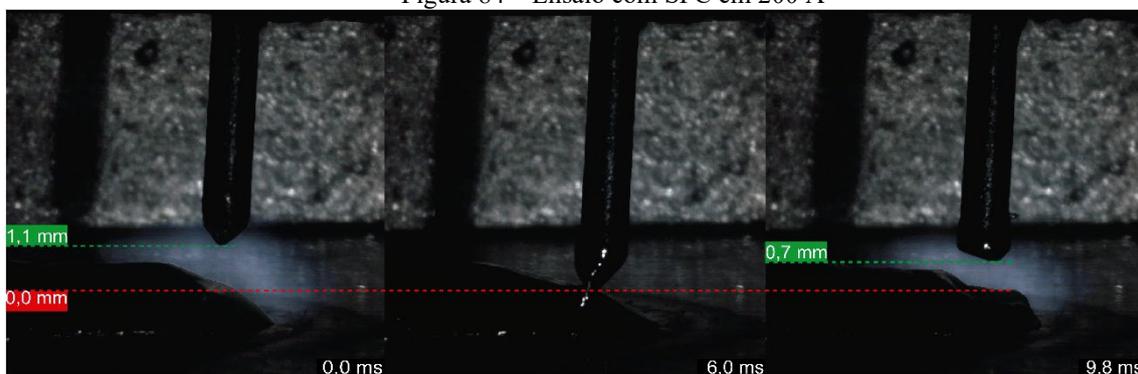
Figura 83 – Ensaio com SPC em 200 A



Fonte:

Autor.

Figura 84 – Ensaio com SPC em 200 A



Fonte:

Autor.

A Tabela 14 apresenta o compilado das macros dos ensaios com o valor de SPT configurado em 100, 150 e 200 A. A largura dos cordões não apresentou uma tendência clara, enquanto a altura do cordão obteve uma tendência de aumento, contudo pouco significativo.

Tabela 14 - Ensaio 2, resultado das macros

| SPT | Largura (mm) | Altura (mm) | Angulo de molhabilidade | Reforço (mm) | Penetração (mm) | Diluição |
|-------|--------------|-------------|-------------------------|--------------|-----------------|----------|
| 100 A | 4,11 | 1,84 | 54,56 | 5,36 | 0,65 | 18,08 |
| 150 A | 5,29 | 2,18 | 58,00 | 7,95 | 0,90 | 20,25 |
| 200 A | 4,69 | 2,22 | 58,07 | 7,25 | 0,81 | 17,25 |

Fonte: Autor.

4.2.2.2 Considerações

Este trabalho utilizou uma fonte de soldagem GMAW proprietária para o estudo do efeito do pulso de corrente na etapa de curto-circuito da onda de corrente característica do CMT convencional. O entendimento dos efeitos causados pela alteração deste único parâmetro torna-se mais claro com este trabalho.

O primeiro ensaio avaliou o processo após alterar apenas a duração do pulso de corrente, entre 0 e 3 ms. Ao definir o tempo como 0,0 ms, removendo o pulso de corrente, foi possível constatar uma redução da frequência de destacamento. Os vídeos de alta velocidade confirmaram que ao remover o pulso, o arame precisa se mover a uma distância maior da poça para romper a ponte metálica. O pulso de corrente na etapa de curto-circuito se mostrou eficiente para iniciar a estrição da ponte metálica, assim auxiliando no rompimento da ponte metálica.

No segundo ensaio foi alterado apenas a amplitude do pulso, o qual se apresentou ainda mais eficiente. Os resultados do segundo ensaio vieram em linha com o ensaio anterior, com o aumento da frequência de destacamento à medida que se aumentou também a amplitude de corrente.

Ambos os ensaios evidenciaram comportamentos indesejados do processo ao definir valores não apropriados para o tempo e para a amplitude do pulso. Ao aplicar pouca energia no pulso, ambos os ensaios apresentaram períodos em que o pulso ajudou na estrição e outros que não, tornando os períodos irregulares. Ao aplicar muita energia, o pulso de corrente provocou a reabertura prematura do arco durante o pulso de corrente, algo indesejado pois isso pode produzir respingos. Outro resultado da reabertura prematura do arco foi o fenômeno nomeado como Effect of Excess Energy in Current Pulse During Short-Circuit Stage, onde ocorre um período curto seguido de um longo.

As conclusões obtidas com a alteração de um único parâmetro da onda de corrente do CMT Convencional irão guiar futuras pesquisas sobre as formas de onda na soldagem GMAW assistida pelo movimento eletromecânico do arame.

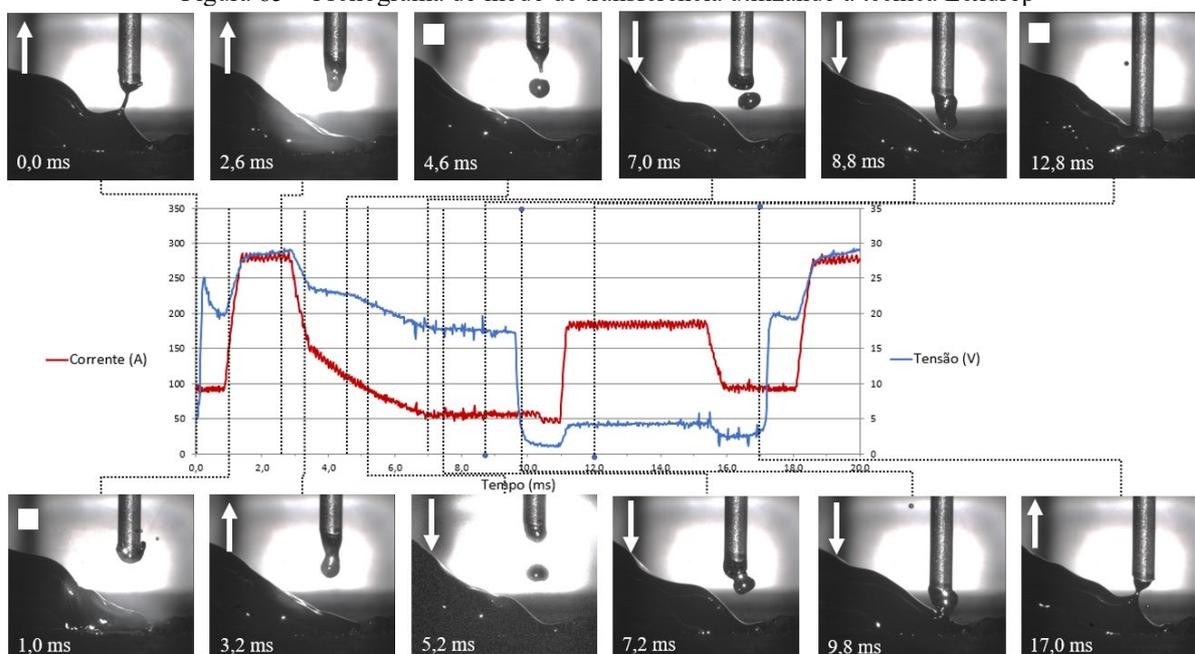
4.2.3 Lexdrop

A reprogramação do *software* responsável pela sequência de movimento do arame, no processo MIG-AD Convencional, resultou em um modo de transferência ainda não documentado. Este modo de transferência foi nomeado pelo autor deste trabalho como Lexdrop.

A nova sequência de movimentos do arame com base na curva de corrente do MIG-AD convencional inclui o movimento de recuo do arame logo após o momento em que o arame para com o arco aberto e a gota formada na ponta do arame, instante 1 ms da Figura 85. O volume da gota de metal em estado líquido eleva o potencial da F_{wd} , permitindo o desprendimento da gota sem elevar o nível da corrente, instante 4,6 ms da Figura 85. Após o

destacamento da gota no instante 4,6 ms o arame para de recuar, neste momento o arco ancora no arame sólido. A curva de corrente neste instante está reduzindo gradativamente até o valor parametrizado como corrente de base no arco. No instante 5,2 ms o arame avança em direção da poça, agora com outra gota de metal fundido na ponta do arame. A velocidade do arame é maior do que a primeira gota, sendo assim, no instante 7,2 ms as duas gotas se reencontram e por tensão superficial inicia o processo da formação de uma gota com, proporcionalmente, grande dimensão. Do momento em que a primeira gota foi formada até o instante em que as duas gotas se reencontram e são depositadas na poça, não foi constatado o efeito chicote ou o efeito repulsivo da gota.

Figura 85 - Oscilograma do modo de transferência utilizando a técnica Lexdrop

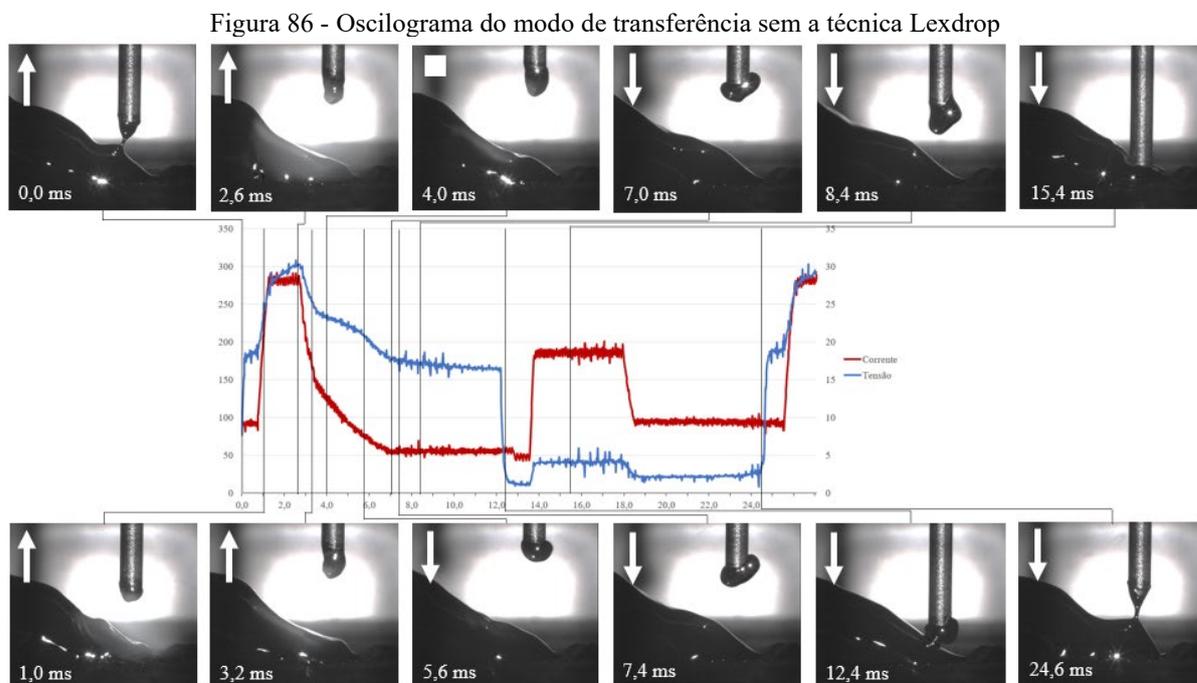


Fonte: Autor

A potência média do processo do instante 4,6 ms até o instante 7,2 ms, período em que o arco volta a acoplar no arame sólido, é de 1549 W, aproximadamente 4 J. Caso o arco estivesse acoplado a gota durante todo o tempo, a gota estaria superaquecendo em vez de fundir material do arame. A hipótese do autor deste trabalho é que a técnica aqui utilizada pode produzir um aumento da eficiência na taxa de fusão, redução de fumos oriundos do superaquecimento da gota, além de permitir a transferência metálica, mecanicamente assistida, de grandes gotas de maneira estável.

Ao reproduzir o experimento sob as mesmas condições da Figura 85, sem a técnica Lexdrop, é possível confirmar que a gota não se desprende do arame sem que haja contato com

a poça de fusão. O fato de o arco estar acoplado durante todo o período na gota contribuiu para o superaquecimento da gota e para o efeito chicote é outra hipótese do autor, visível no instante 7,4 ms da Figura 86.



Fonte: Autor.

A utilização da técnica Lexdrop pode apresentar melhorias na produção de cordões para aplicações em revestimento ou até mesmo no campo da MA. É necessária uma maior exploração dos parâmetros do processo para analisar a técnica sob condições variadas e se é possível manter a sua estabilidade.

"A ciência só é útil se nos diz algo sobre experimentos que ainda não foram feitos"
(Richard Feynman)

4.2.4 Aplicação do MIG-AD em revestimento

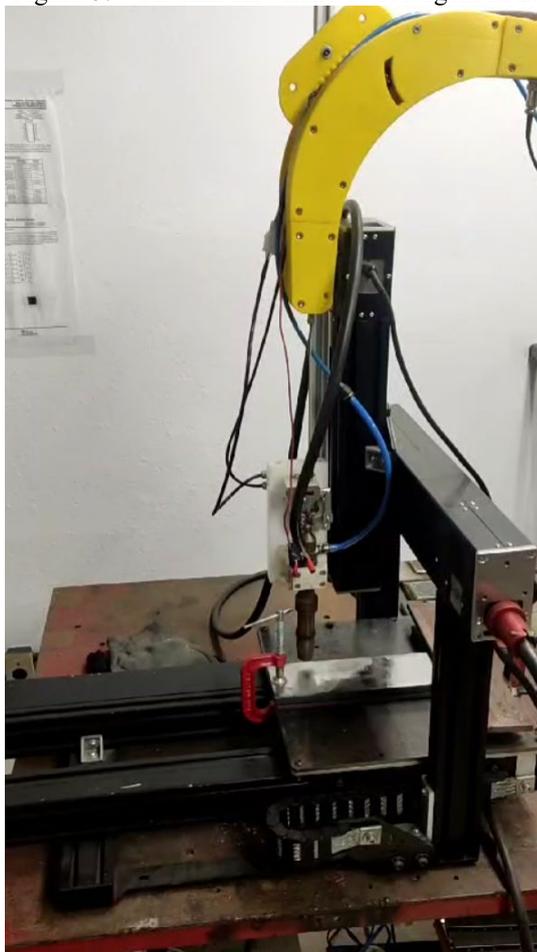
As aplicações de revestimento, comumente, são utilizadas para aplicar um material nobre, de elevada resistência mecânica, em uma superfície composta por um metal de menor custo. Este tipo de aplicação exige que o material de adição não seja diluído no material de base, para que suas propriedades sejam mantidas. Não obstante, é crucial que o calor introduzido pelo processo de revestimento seja mínimo, assegurando a solda do material de adição na peça com o mínimo de diluição de ambos os materiais. O uso da fonte de soldagem

GMAW-DF torna-se a melhor escolha, devido as características do processo de transferência metálica, possibilitando o controle preciso da diluição do cordão[23] [91]. Este controle permite que se obtenha melhores resultados em testes de resistência a corrosão, em comparação com o revestimento feito por uma fonte de soldagem TIG [92].

Procurando atender a um dos objetivos estabelecidos no início do desenvolvimento deste trabalho, a fonte de soldagem MIG-AD foi utilizada em um ensaio de revestimento. O objetivo não será a análise do revestimento, mas o comportamento da fonte de soldagem frente a esta aplicação.

O ensaio contou com uma mesa cartesiana de 3 eixos da SPS, Figura 87. Desta maneira o espaçamento entre os cordões e o comprimento deles puderam ser programados e executados automaticamente.

Figura 87 - Sistema cartesiano de soldagem SPS.

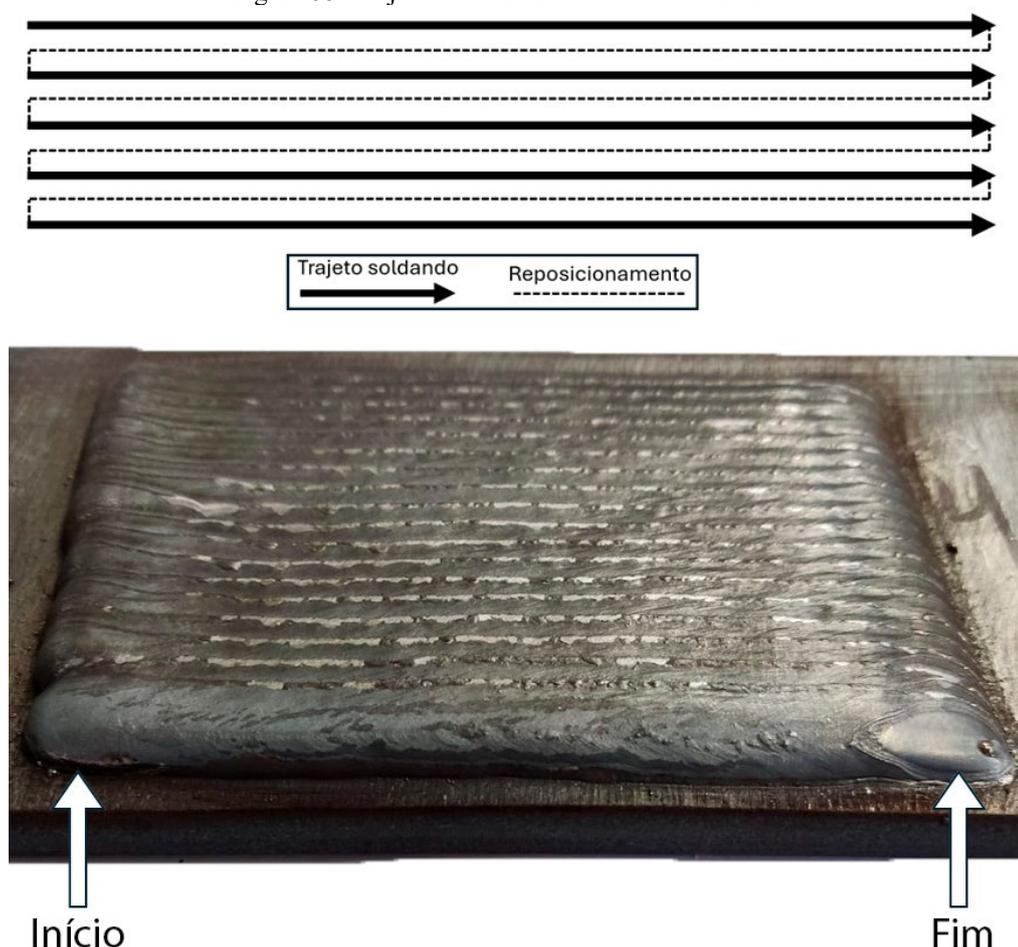


Fonte: Autor.

Para a aquisição dos dados de corrente e tensão ao longo dos cordões de solda, foi utilizado o SAP. Complementar ao SAP, foram aquisitados os dados relacionados ao

movimento do motor utilizando o osciloscópio integrado ao driver da Kollmorgen, permitindo calcular os valores de velocidade de arame média, com o auxílio do Matlab. A câmera de alta velocidade, IDT Motion-pro Y4S2, foi instalada como apoio para análise de problemas complexos de serem compreendidos somente com os sinais elétricos de tensão e corrente. As chapas são de 76 mm de largura por 12,7 de espessura. O comprimento dos cordões foram de 60 e 100 mm. O gás de processo foi uma mistura de 8% de CO₂ e 92% de argônio, com uma vazão de 15 l/min. A velocidade de soldagem foi fixada em 50 cm/min, com um espaçamento entre cordões de 3,3 mm. Em cada chapa foram depositados 20 cordões, sem tempo de espera entre cordões, iniciando o cordão sempre do mesmo lado da chapa.

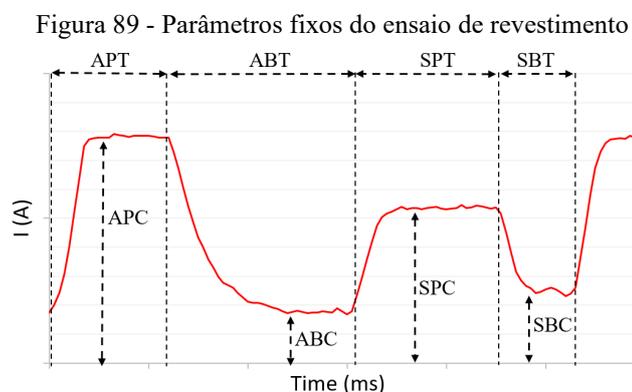
Figura 88- Trajeto da tocha no ensaio de revestimento



Fonte: Autor.

A onda de corrente utilizada foi a já apresentada em capítulos anteriores, similar a utilizada no CMT convencional. Os parâmetros que se mantiveram fixos ao longo do ensaio estão na Figura 89. O valor do parâmetro APT e APC foram alterados de 5 a 6 ms e 195 a 240

A, respectivamente. O valor do parâmetro ABC foi de 70 A apenas no primeiro revestimento, sendo alterado para 90 A para os 3 revestimentos seguintes.



| Parameters | |
|------------------------------------------|------------------|
| Tempo de pulso no curto (SPT) | 3 ms |
| Corrente de pulso no curto (SPC) | 150 A |
| Tempo de base no arco (ABT) | Não configurável |
| Tempo de base no curto-circuito (SBT) | Não configurável |
| Corrente de base no curto-circuito (SBC) | 90 A |

Fonte: Autor

4.2.4.2 Resultados e discussões

Este ensaio foi cenário de ajustes devido a algumas dificuldades impostas pelo processo de revestimento. A abertura do arco ao iniciar o cordão e o encerramento do arco ao finalizar o cordão foram motivo para muitas horas de ajustes até que se chegasse na lógica de controle que obtivesse sucesso.

O arame encontra uma chapa limpa ao iniciar o primeiro cordão para iniciar o revestimento, contudo, à medida que o primeiro cordão é depositado o processo deixa as proximidades do cordão com fuligem. Ao iniciar os próximos cordões o arame encontra uma superfície suja na qual não a fonte não conseguiu abrir o arco elétrico ou até mesmo grudou o arame na chapa, na medida em que foram sendo feitos ajustes na lógica da fonte, para a abertura.

Já o encerramento do cordão por muitas vezes acabava por grudar o arame na poça. Ao iniciar o reposicionamento da mesa cartesiana o arame se mantinha grudado, sendo necessário interromper o processo. Foi necessário incluir algumas etapas na lógica de encerramento do arco para que evitasse este tipo problema. A dificuldade do ajuste é que não se pode puxar muito o arame, pois a depender da posição em que ele está antes de se iniciar o encerramento, o arame pode ser puxado para dentro do bico de contato. Muitas vezes o arame fica preso dentro do bico de contato e o ensaio é interrompido.

Após muitos testes, os ajustes na lógica de programação da abertura e de encerramento do cordão foram finalizados. Tornando possível a utilização da fonte de soldagem MIG-AD sem interrupções.

A Tabela 15 apresenta 4 amostras de dados recolhidos do primeiro ensaio de revestimento, em que o valor do tempo de pulso no arco foi de 5 ms com uma amplitude de 195 A, já o valor de corrente de base no arco foi fixado em 70 A. É possível perceber que os valores de velocidade de arame se mantiveram constante ao longo dos cordões, junto a potência, a corrente e a tensão. Entre o primeiro e o segundo cordão é possível constatar um aumento na frequência de destacamento. A causa desse fenômeno é atribuída ao aquecimento da chapa, após a conclusão do primeiro cordão.

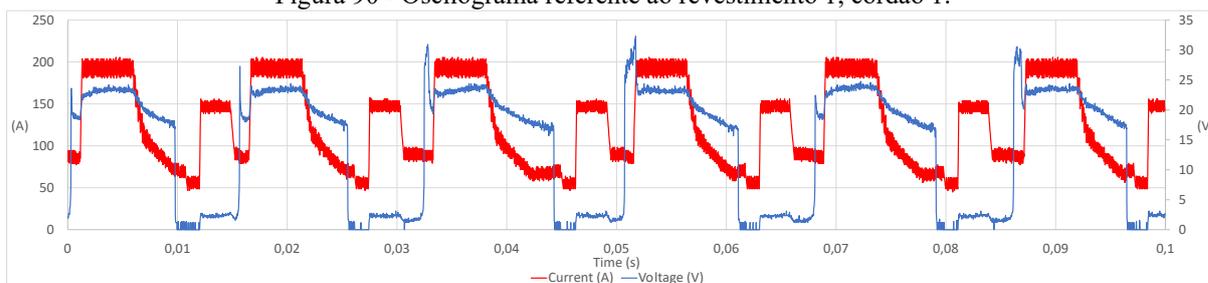
Tabela 15 - Ensaio de revestimento 1

| Cordão | Frequência de destacamento (Hz) | Velocidade de arame (m/min) | Potência (kW) | Corrente (A) | Tensão (V) | Tempo de arco (ms) | Tempo de curto (ms) |
|--------|---------------------------------|-----------------------------|---------------|--------------|------------|--------------------|---------------------|
| 1 | 55,9 | 2,53 | 2,1 | 124,2 | 13,5 | 11,0 ± 1,1 | 6,9 ± 0,9 |
| 2 | 58,5 | 2,55 | 2,1 | 127,0 | 13,1 | 10,6 ± 0,8 | 6,5 ± 1,0 |
| 4 | 59,9 | 2,55 | 2,1 | 128,2 | 13,1 | 10,4 ± 0,7 | 6,3 ± 0,8 |
| 6 | 59,9 | 2,55 | 2,1 | 128,6 | 13,1 | 10,4 ± 0,8 | 6,3 ± 0,9 |

Fonte: Autor.

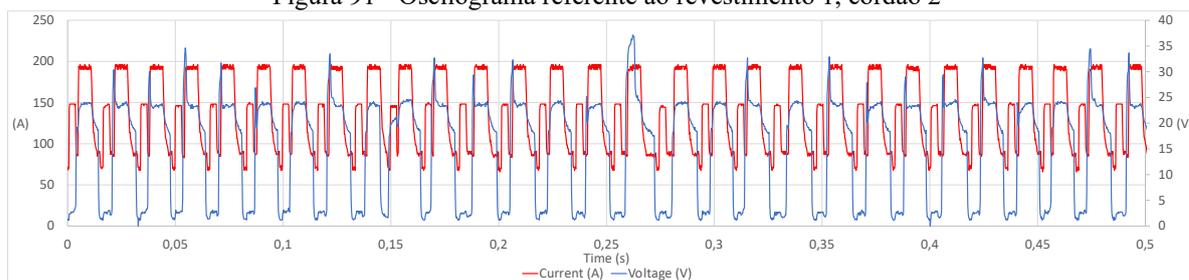
Com o objetivo de apresentar a regularidade do processo é apresentado na Figura 90 os sinais de tensão e corrente referente ao primeiro cordão depositado. Um ponto importante a ser destacado na imagem é a reabertura do arco, que em todos os períodos ocorreu durante a fase de corrente de base no curto. Para reforçar a estabilidade do processo a Figura 91 apresenta o oscilograma do segundo cordão em um período de 0,5 s, no qual a regularidade da onda de corrente confirma a regularidade em que a fonte MIG-AD foi capaz de reproduzir. A regularidade do oscilograma se traduz na regularidade dos cordões apresentados na Figura 92.

Figura 90 - Oscilograma referente ao revestimento 1, cordão 1.



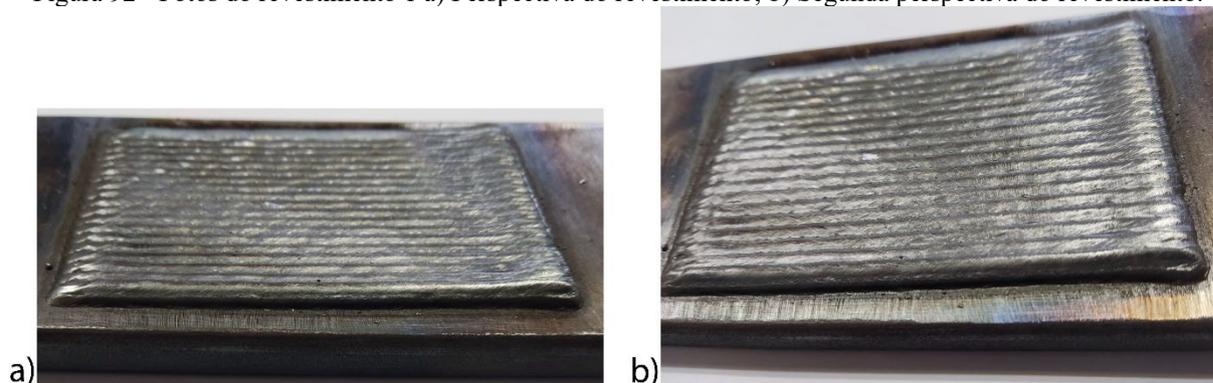
Fonte: Autor.

Figura 91 - Oscilograma referente ao revestimento 1, cordão 2



Fonte: Autor.

Figura 92 - Fotos do revestimento 1 a) Perspectiva do revestimento; b) Segunda perspectiva do revestimento.



Fonte: Autor.

Os ensaios 2, 3 e 4, foram compilados na Tabela 16, cujos valores apresentados são medias dos diferentes cordões monitorados em cada ensaio. Para o ensaio do revestimento 2 foi utilizado um pulso de 195 A com duração de 6 ms, já com o valor de corrente de base no arco em 90 A. O revestimento 3 foi executado com um pulso de 240 A pôr 5 ms, mantendo o valor de corrente de base no arco em 90 A. O revestimento que encerrou os ensaios foi o de número 4, no qual foi utilizado um pulso de 240 A pôr 6 ms, também mantendo o valor da corrente de base no arco em 90 A.

Tabela 16 – Resultado dos ensaios de revestimento 2, 3 e 4.

| Revest. | Frequência de destacamento (Hz) | Velocidade de arame (m/min) | Potência (kW) | Corrente (A) | Tensão (V) | Tempo de arco (ms) | Tempo de curto (ms) |
|---------|---------------------------------|-----------------------------|---------------|--------------|------------|--------------------|---------------------|
| 2 | 56,0 | 3,29 | 2,33 | 138,9 | 14,7 | 11,5 ± 0,9 | 6,4 ± 1,0 |
| 3 | 58,0 | 4,06 | 2,78 | 151,5 | 15,68 | 11,4 ± 0,9 | 5,8 ± 1,0 |
| 4 | 57,1 | 4,29 | 3,0 | 157,0 | 16,10 | 11,64 ± 0,9 | 5,94 ± 1,0 |

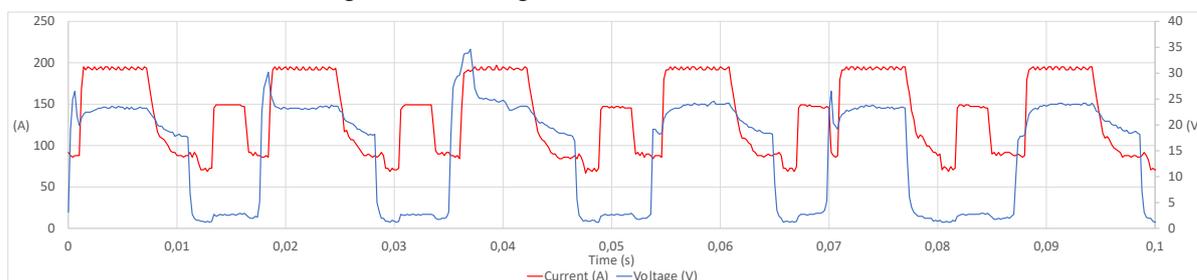
Fonte: Autor.

A frequência de destacamento apresentou uma variação pouco significativa. É possível constatar um aumento da velocidade de arame a medida em que se aumentou a potência utilizada para depositar os cordões. Os valores de desvio padrão dos tempos de arco e de curto

não se alteraram, evidenciando que o aumento da potência aplicada não resultou em aumento de irregularidade nos períodos.

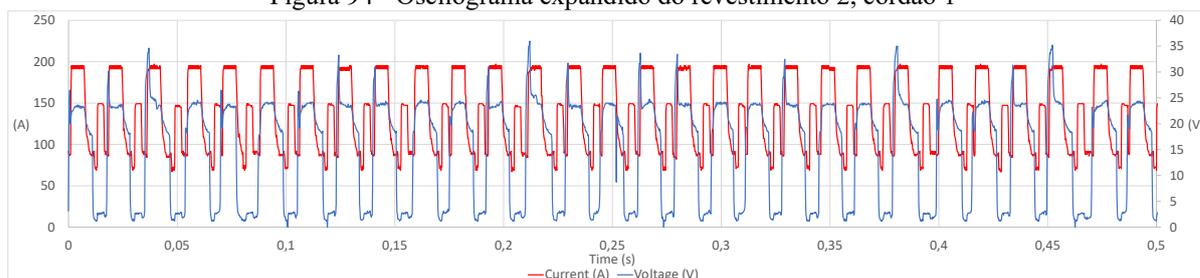
Procurando analisar melhor a presença de irregularidades nos períodos, a Figura 93 apresenta um trecho do oscilograma aquisitado no primeiro cordão depositado no revestimento 2. Fica claro ao final do quarto ciclo que o arco abriu antes da conclusão do pulso de corrente na fase de curto-circuito, resultando em sequência em um curto-circuito antes do previsto, ao final do pulso de corrente na fase de arco. Outra constatação de que este conjunto de parâmetros precisa de ajustes é o sinal de tensão do terceiro ciclo, pois é possível constatar uma variação anormal da tensão. Para analisar a regularidade do processo é apresentado na Figura 94 o oscilograma expandido. O oscilograma expandido permite constatar que outros ciclos também apresentam sinais de irregularidades, contudo, ao examinar o tempo entre períodos, fica claro que apesar destes erros o programa da fonte manteve uma consistência nos tempos entre os ciclos. Esta consistência é sinal de que, mesmo com a presença de eventos não previstos, o sistema de controle como um todo manteve a operação estável. O oscilograma com os dados do quarto cordão depositado no revestimento 2 e o oscilograma expandido estão apresentados na Figura 95 e Figura 96, respectivamente, com o objetivo de constatar se os mesmos problemas ocorridos no primeiro cordão se repetiram ao longo de todo o depósito. A frequência dos picos de tensão na reabertura reduziu, contudo, a abertura do arco antes do encerramento completo do pulso de corrente, na fase de curto, persistiu. Já a periodicidade foi mantida, como constatado no primeiro cordão.

Figura 93 - Oscilograma do revestimento 2, cordão 1



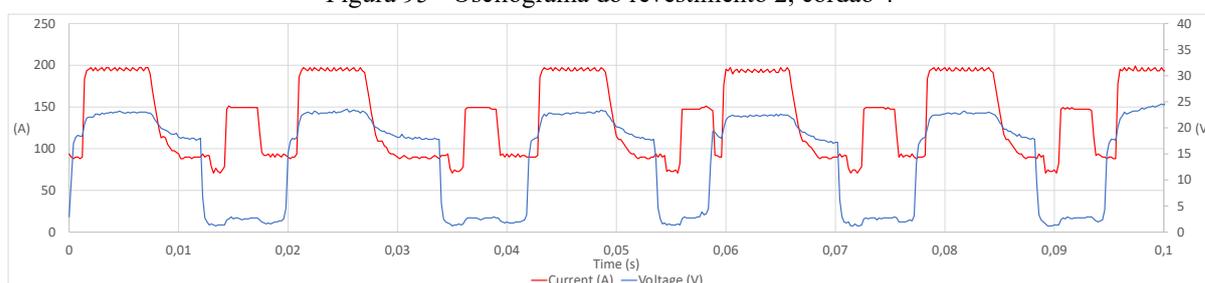
Fonte: Autor.

Figura 94 - Oscilograma expandido do revestimento 2, cordão 1



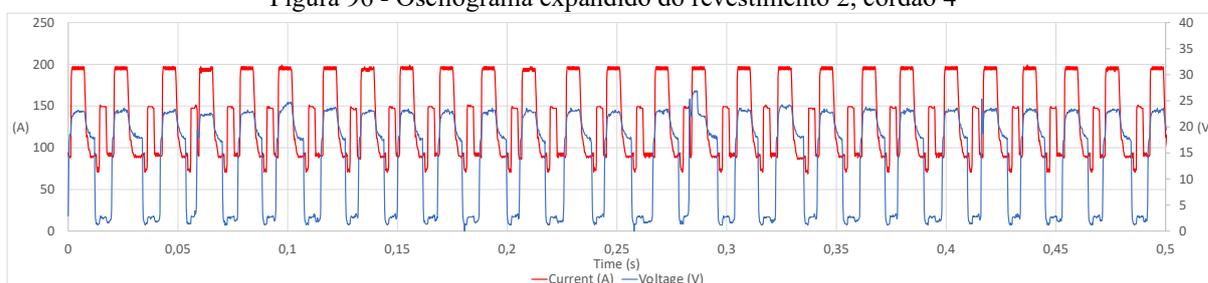
Fonte: Autor.

Figura 95 - Oscilograma do revestimento 2, cordão 4



Fonte: Autor.

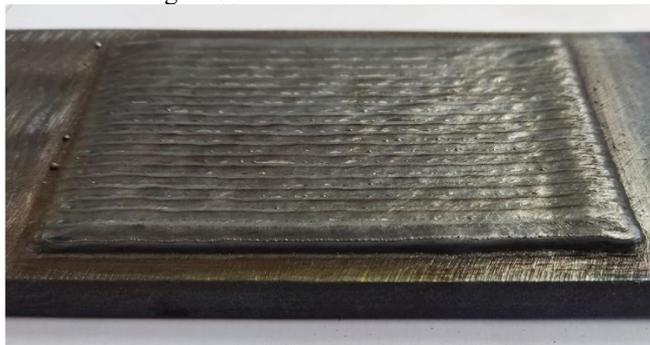
Figura 96 - Oscilograma expandido do revestimento 2, cordão 4



Fonte: Autor.

A foto do revestimento 2, Figura 97, apresenta uma superfície com cordões bem definidos e uniformemente aplicados. O acabamento indica um processo de revestimento controlado. Apesar de ser necessário alguns ajustes para eliminar as irregularidades encontradas no sinal de tensão e corrente, anteriormente apresentado, o revestimento 2 demonstra que essas variações foram minimizadas, resultando em um revestimento uniforme.

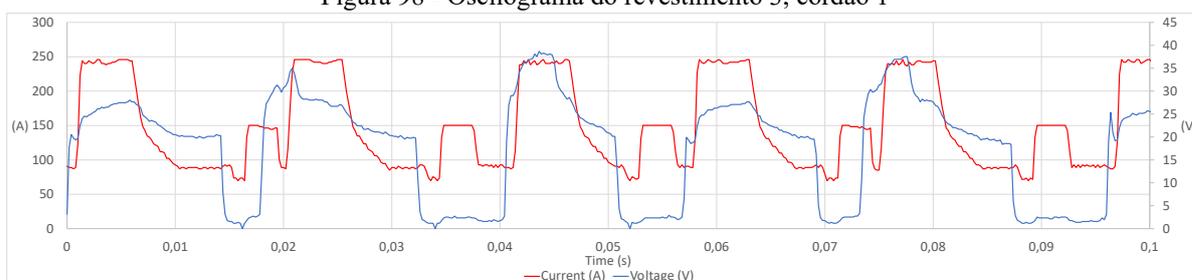
Figura 97 - Foto do revestimento 2



Fonte: Autor.

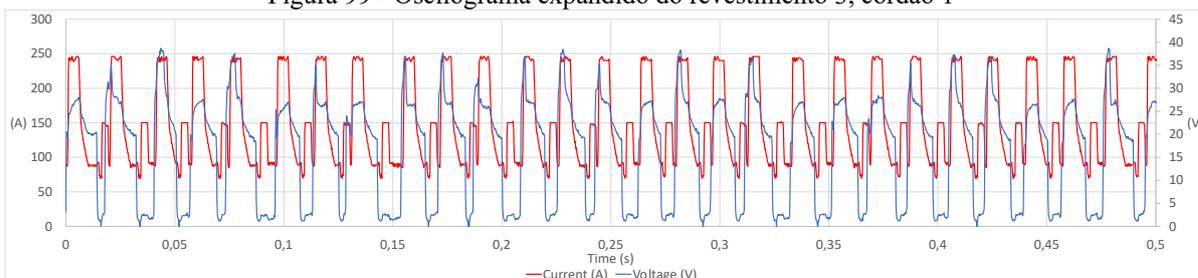
O oscilograma capturado no primeiro cordão do terceiro revestimento, Figura 98, apresentou um aumento das ocorrências de reabertura do arco durante o período de pulso no curto. Quando analisado o oscilograma expandido, Figura 99, ficou confirmado que o revestimento 3 apresentou mais ocorrências deste erro, apesar de manter a regularidade dos períodos. Quando analisado o oscilograma do quarto cordão do revestimento 3, Figura 100, e o mesmo oscilograma com mais períodos, Figura 101, percebe-se que o número de picos de tensão decorrentes de instabilidades reduziu, apesar de manter a ocorrência de reabertura durante o pulso no curto.

Figura 98 - Oscilograma do revestimento 3, cordão 1



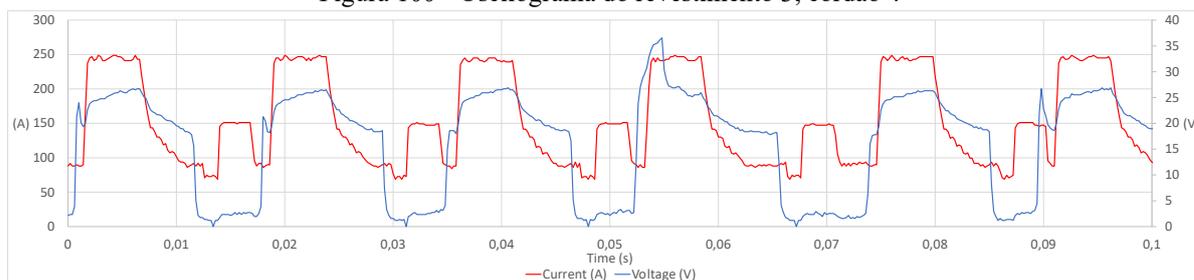
Fonte: Autor.

Figura 99 - Oscilograma expandido do revestimento 3, cordão 1



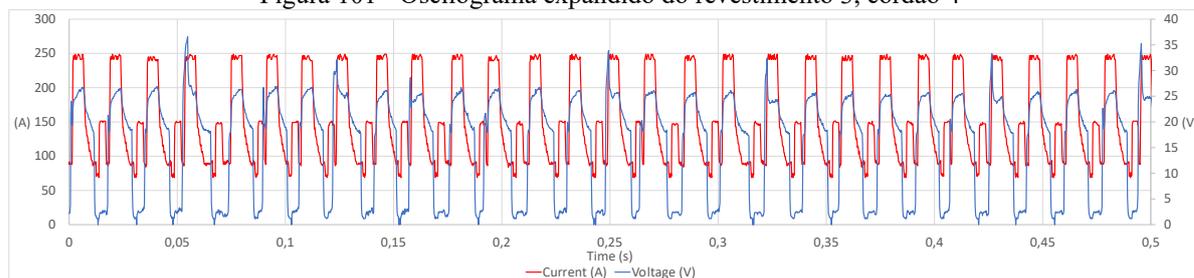
Fonte: Autor.

Figura 100 - Oscilograma do revestimento 3, cordão 4



Fonte: Autor.

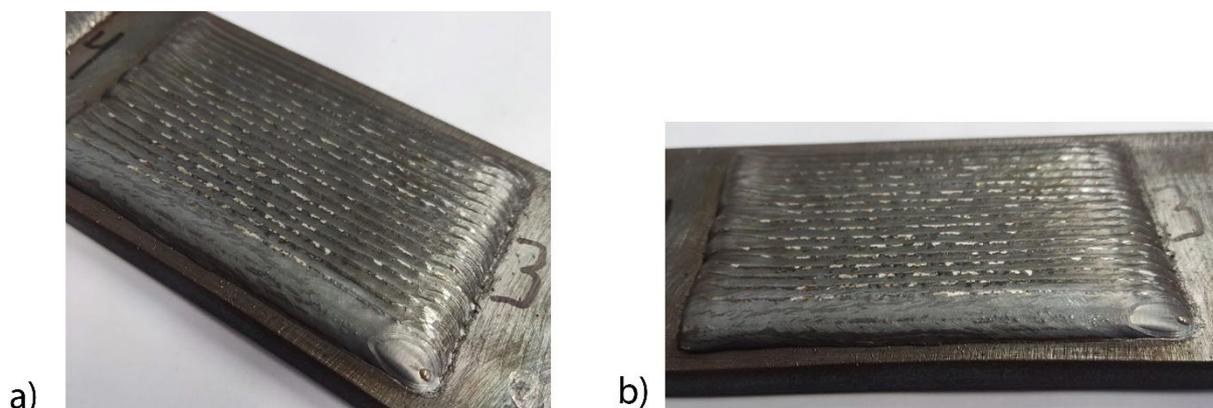
Figura 101 - Oscilograma expandido do revestimento 3, cordão 4



Fonte: Autor.

A Figura 102, composta pelas imagens a) e b), apresenta que os cordões estão mais largos em comparação com os revestimentos anteriores. Este aumento é indicativo do aumento da velocidade de arame, resultado do aumento da energia aplicada durante a fase de arco. Também é possível afirmar que foi mantido uma boa regularidade no depósito dos cordões, mantendo-se uma superfície regular.

Figura 102 - Fotos do revestimento 3 a) Perspectiva do revestimento; b) Segunda perspectiva do revestimento

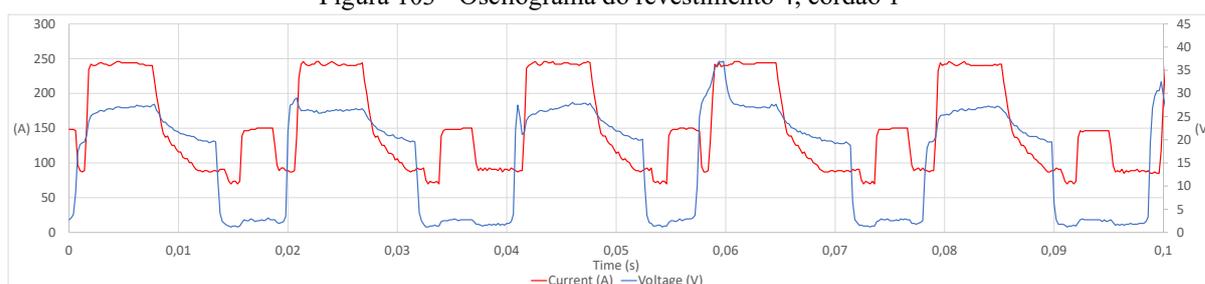


Fonte: Autor.

O último revestimento apresentou características similares ao revestimento 3, com a ocorrência de reabertura de arco ainda durante a fase de pulso no curto, como apresentado na

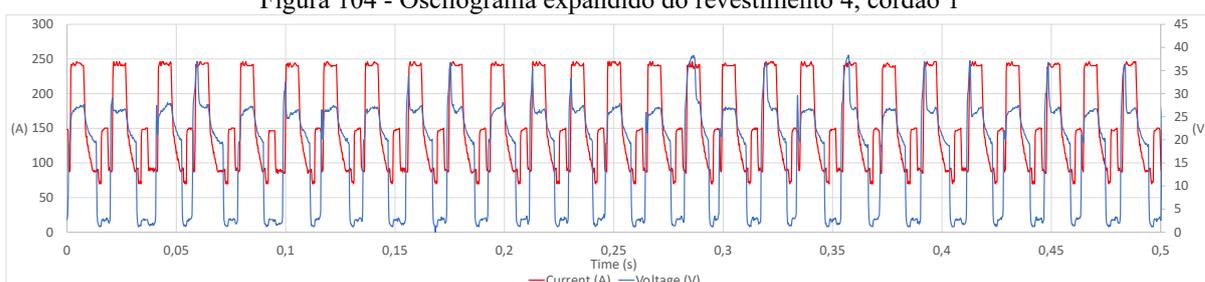
Figura 103, onde é apresentado o oscilograma do primeiro cordão depositado no revestimento 4. Já o oscilograma do quarto cordão, Figura 105, mostra que estas ocorrências reduziram, o que pode ser confirmado quando comparamos os oscilogramas expandidos do primeiro e quarto cordão, na Figura 104 e Figura 106, respectivamente. Apesar destas ocorrências o acabamento do revestimento, Figura 107, ficou satisfatório após uma inspeção visual.

Figura 103 - Oscilograma do revestimento 4, cordão 1



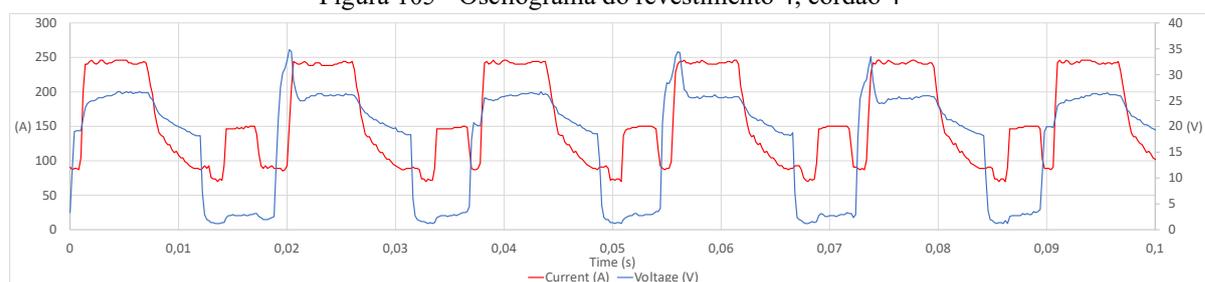
Fonte: Autor.

Figura 104 - Oscilograma expandido do revestimento 4, cordão 1



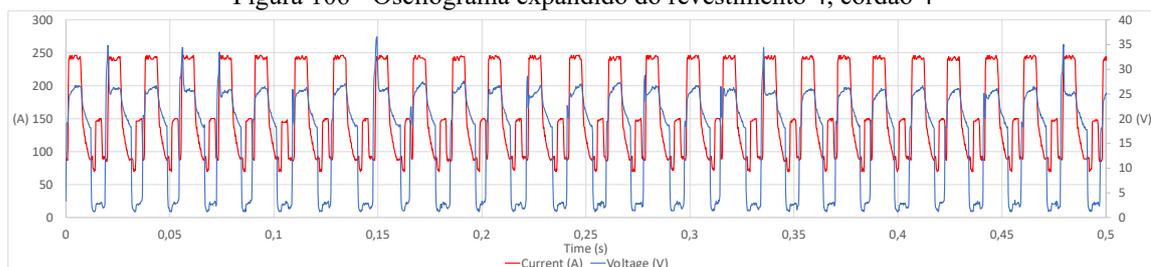
Fonte: Autor.

Figura 105 - Oscilograma do revestimento 4, cordão 4



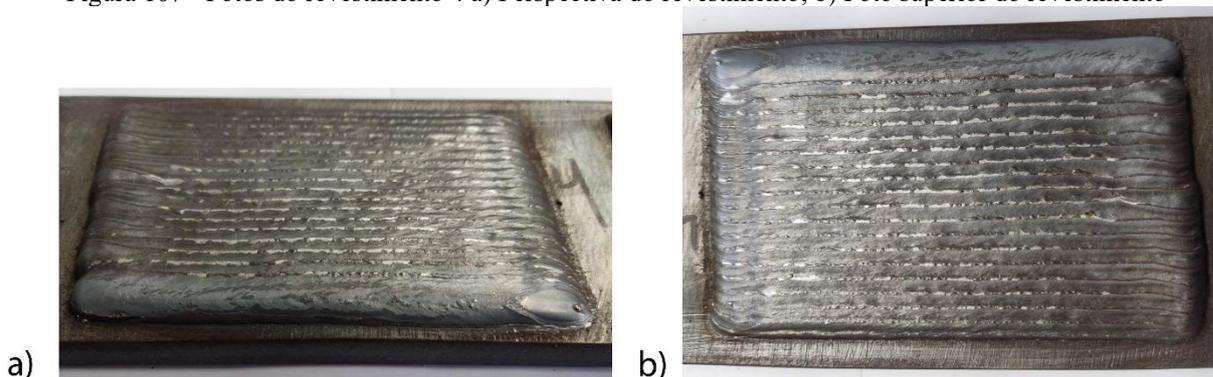
Fonte: Autor.

Figura 106 - Oscilograma expandido do revestimento 4, cordão 4



Fonte: Autor.

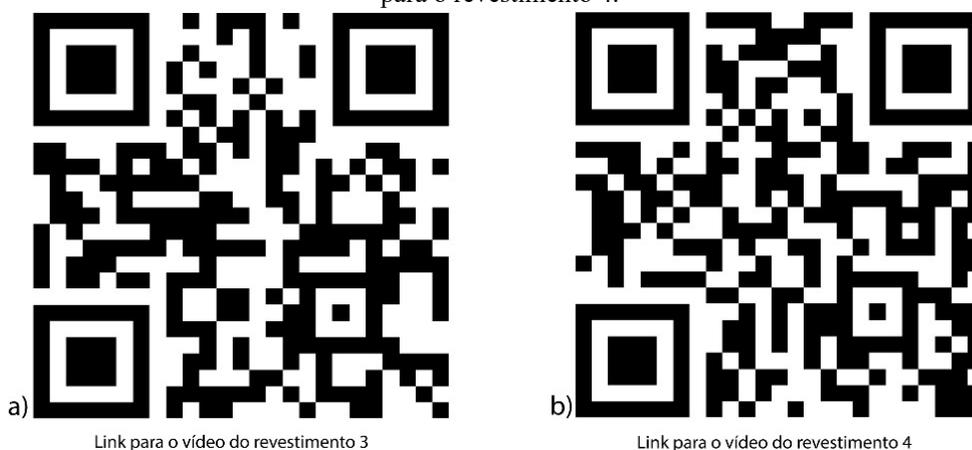
Figura 107 - Fotos do revestimento 4 a) Perspectiva do revestimento; b) Foto superior do revestimento



Fonte: Autor.

Sabendo que para especialistas na área de soldagem o som emitido pelo processo pode dizer muito da regularidade do mesmo, foram feitas filmagens do revestimento 3 e do revestimento 4, do primeiro ao último cordão, para que fique evidenciado a robustez da fonte MIG-AD. O link para assistir as filmagens estão na Figura 108.

Figura 108 - QRCode para vídeos do processo de revestimento. a) Link para o vídeo do revestimento 3; b) Link para o revestimento 4.



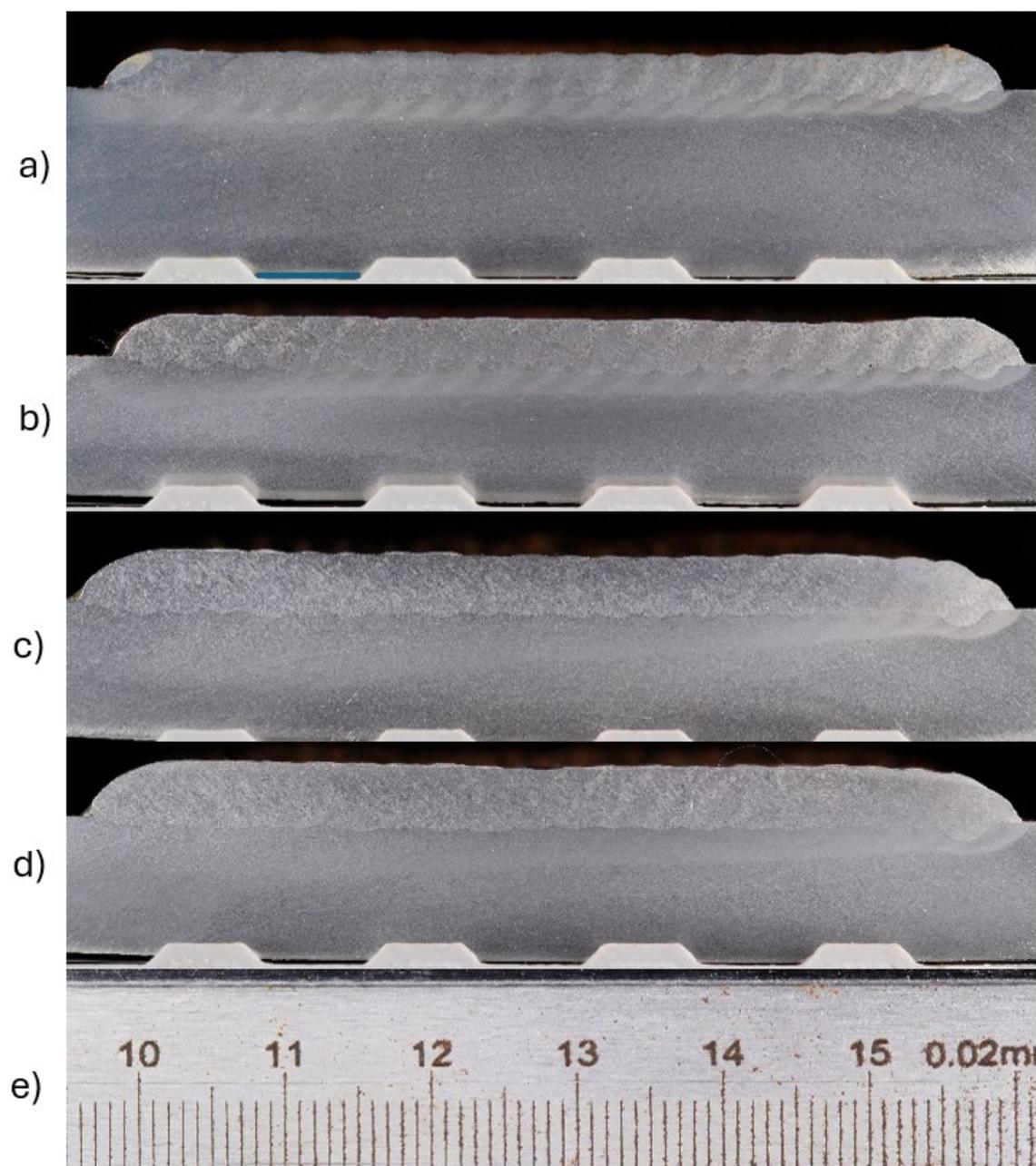
Link para o vídeo do revestimento 3

Link para o vídeo do revestimento 4

Fonte: Autor.

As macrografias dos revestimentos estão apresentadas na Figura 109, não sendo possível constatar falta de fusão ou porosidade aparente. O Revestimento 1 apresentou 0,7 mm de penetração e 3,2 mm de reforço. O Revestimento 2 apresentou 1,0 mm de penetração e 3,4 mm de reforço. O Revestimento 3 apresentou 3,8 mm de reforço e 1,3 mm de penetração. O revestimento 4 apresentou 4,1 mm de reforço e 1,3 mm de penetração.

Figura 109 - Macrografias dos revestimentos. a) Revestimento 1. b) Revestimento 2. c) Revestimento 3. d) Revestimento 4, e) Referência



Fonte: Autor.

Tabela 17 - Medições dos revestimentos 1, 2, 3 e 4.

| Revestimento | Reforço (mm) | Penetração (mm) |
|--------------|--------------|-----------------|
| 1 | 3,2 | 0,7 |
| 2 | 3,4 | 1,0 |
| 3 | 3,8 | 1,3 |
| 4 | 4,1 | 1,3 |

Fonte: Autor

4.2.4.3 Considerações

O ensaio de revestimento foi proposto pelos objetivos específicos deste trabalho. A sua implementação exigiu a instalação de um novo manipulador capaz de operar automaticamente em dois eixos, sendo utilizado o manipulador de 3 eixos da SPS. Ao longo dos ensaios foi constatado que o firmware da fonte MIG-AD estava suscetível a falhas quando a abertura de arco era executada em uma superfície com fuligem. A solução deste problema foi a reprogramação da lógica de abertura do arco para que a fonte fosse capaz de executar este tipo de tarefa. O encerramento do cordão também apresentou problemas durante os ensaios, ficando grudado o arame na poça, causando problemas para o manipulador no momento do reposicionamento da tocha. A solução também foi a reprogramação da lógica de controle, o que já foi capaz de resolver este problema.

Os revestimentos obtidos após as resoluções de problemas prévios mostram que a fonte MIG-AD já está pronta para aplicações em revestimento, sendo necessário previamente definir um conjunto maior de parâmetros que permitam uma deposição estável, para que o usuário tenha mais opções de velocidade de arame.

Como já mencionado no início deste capítulo, os revestimentos não foram o objetivo deste ensaio, mas sim o comportamento e a resposta da fonte ao usá-la em aplicação de revestimento. Ficando confirmado que o seu uso já é possível, permitindo aplicações cada vez mais complexas à medida que seja necessário, pois a fonte MIG-AD permite o controle total de todos os seus parâmetros.

4.2.5 Aplicação do MIG-AD em WAAM

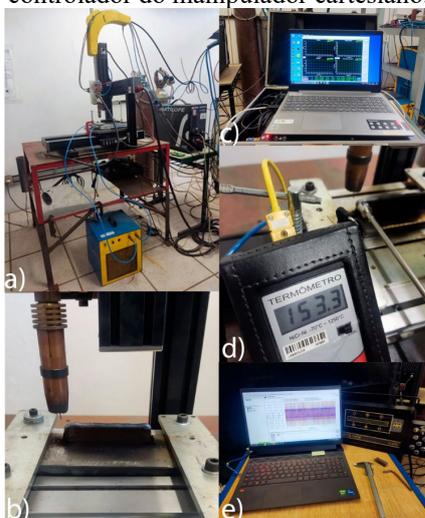
Buscando avaliar a aplicação da fonte MIG-AD em WAAM, foi proposto um ensaio para avaliar uma técnica para fabricação de paredes. Um dos desafios do processo de fabricação

de paredes é manter a geometria da peça, particularmente no início e no final dos cordões de solda. Foram fabricadas três paredes de aço, permitindo a comparação de técnicas para minimizar essas deformações. Em todas as paredes foi utilizado o método de deposição bidirecional. A primeira técnica envolveu manter a deposição de material por 0,5 segundos no final do cordão, enquanto a segunda técnica aplicou a mesma duração de deposição no início do cordão, visando compensar a altura nesses pontos. Para avaliar estas duas técnicas, distintas, foi feita uma terceira parede para comparação.

A fonte de soldagem MIG-AD, acoplada ao manipulador cartesiano 3 eixos Figura 110 a). O material base consistiu em placas de aço ao carbono ASTM A36, com aproximadamente 76 x 200 mm de tamanho e 12,7 mm de espessura. O material de adição selecionado foi um arame ER70S-6 de 1,2 mm de diâmetro. Para o gás de proteção, utilizou-se uma mistura de 8% CO₂ e 92% argônio, com uma taxa de fluxo de 20 l/min. O procedimento experimental envolveu a formação de três paredes, cada uma com 120 mm de comprimento e 20 camadas de altura, sobre a superfície da chapa. As chapas foram fixadas sobre uma base refrigerada de alumínio, Figura 110 b).

A monitoração foi realizada capturando sinais elétricos através de um sistema de aquisição (SAP), Figura 110 c). Antes de iniciar cada cordão foi utilizado um sensor de contato, Figura 110 d), para avaliar se a peça estava abaixo de 150°C. Foi utilizado o osciloscópio interno do servo drive Kollmorgen Workbench para monitorar a dinâmica da alimentação do arame, Figura 110 e).

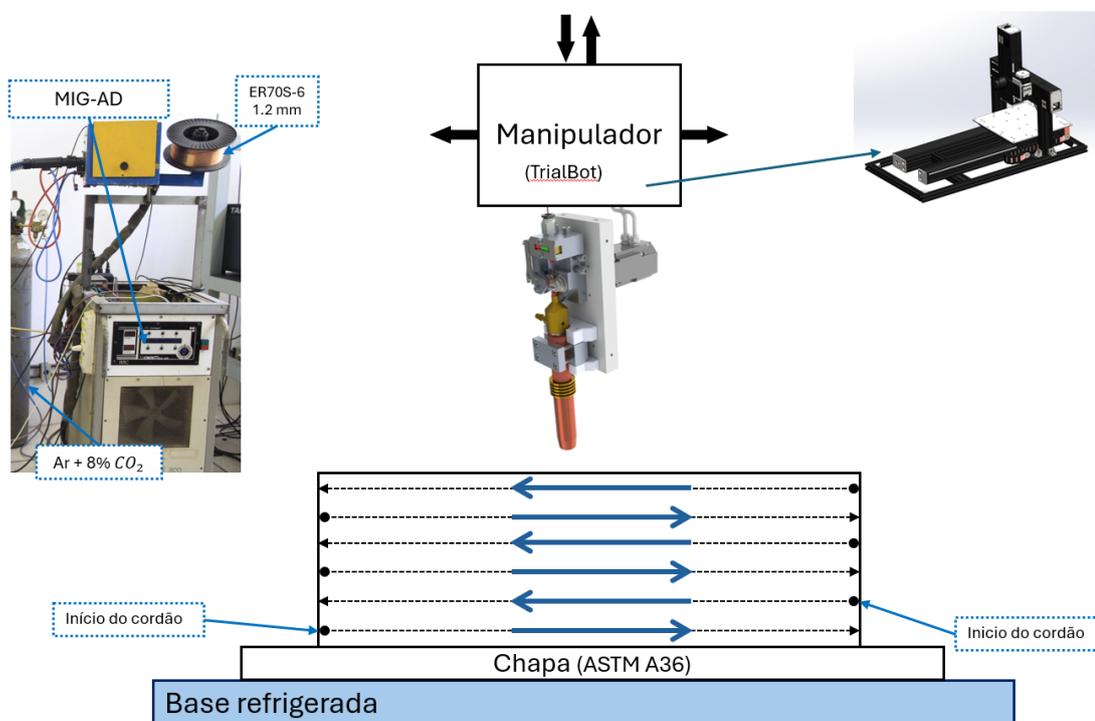
Figura 110 - Equipamentos utilizados para a produção dos ensaios e aquisição dos dados de soldagem. a) Bancada de Trabalho MIG-AD; b) Sistema de fixação de peças na base refrigerada; c) Sistema de aquisição de dados de soldagem (SAP); d) Sensor de contato; e) Software de aquisição de dados para o motor de servo e controlador do manipulador cartesiano.



Fonte: Autor.

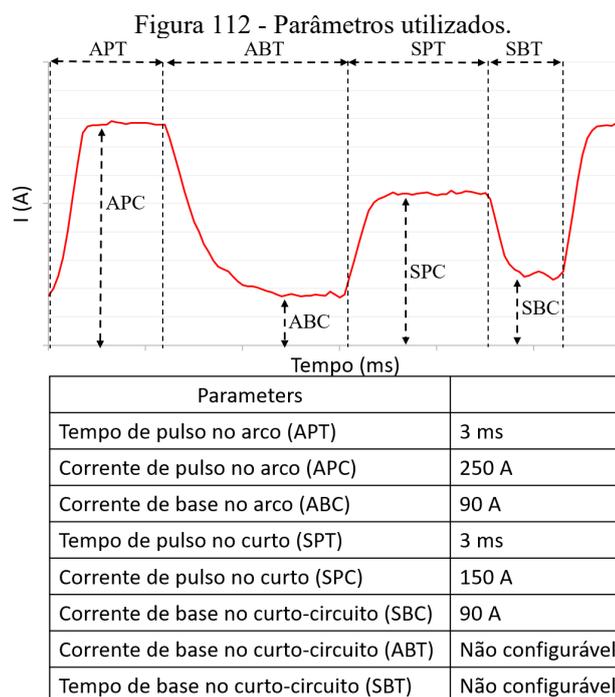
O manipulador foi programado para depositar os cordões utilizando a estratégia de deposição bidirecional apresentada na Figura 111. Para definir o acréscimo na altura foi feito um cordão inicialmente e mensurado com o auxílio de um paquímetro, o qual apresentou uma altura de 2 mm. Foi utilizado um paquímetro da marca Mitutoyo (número de série A21084178), calibrado pelo Centro de Metrologia e Instrumentação em 08 de maio de 2023, conforme o Certificado de Calibração nº 1334/23. O acréscimo configurado no manipulador cartesiano foi de 1,8 mm, respectivo a 90% da altura do cordão inicial. A distância do bico de contato com a peça foi mantida em 15 mm e monitorado ao longo da fabricação da parede para aplicar correções, caso necessário.

Figura 111 - Bancada para realização do ensaio de fabricação de parede



Fonte: Autor.

A estratégia avaliada neste trabalho consiste em manter a fonte acionada para depositar material no final ou início de cada cordão, com o objetivo de compensar a distorção na geometria das extremidades das paredes produzidas por WAAM. O objetivo é verificar se a adição de material nesses pontos reduz a distorção na altura.



Fonte: Autor.

O manipulador TrialBot foi configurado para exigir o acionamento de um botão no controle para iniciar o próximo cordão, permitindo a monitoração da temperatura da parede por meio de um sensor de contato. Definiu-se que o próximo cordão seria iniciado após a peça atingir uma temperatura inferior a 150°C.

O ensaio foi dividido em três:

1. Fabricar uma parede com 20 camadas sem o uso das estratégias para servir como referência;
2. Avaliar a primeira estratégia, onde ao final de cada cordão a fonte manterá a deposição do material com a tocha parada por 0,5 segundos;
3. Avaliar a segunda estratégia, mantendo a tocha parada com a fonte acionada, por 0,5 segundos, no início de cada cordão.

4.2.5.2 Resultados e discussões

A Tabela 18 apresenta o compilado das camadas 1, 5, 10, 15 e 20 da parede fabricada como referência para o ensaio. Observou-se um aumento, pouco expressivo, na frequência de deposição, após o primeiro cordão, atribuindo-se este resultado ao pré-aquecimento da peça nas camadas subsequentes. Esta mesma conclusão é aplicada a pequena mudança ocorrida na tensão e na corrente entre o resultado da primeira camada em comparação com as seguintes. Essa afirmação fica mais evidenciada quando se avalia o tempo de curto-circuito, pois na primeira

camada foi de 8 ms, em comparação com as seguintes em que chegou a atingir 7 ms na camada 20. A velocidade de arame não apresentou variação significativa, ao longo das camadas, o que contribui para a manutenção da geometria da parede. Estas variações são possíveis devido a fonte de soldagem MIG-AD não realizar ajustes automáticos nos parâmetros da soldagem ao longo do processo para manter a velocidade de arame, como é comum em fontes comerciais.

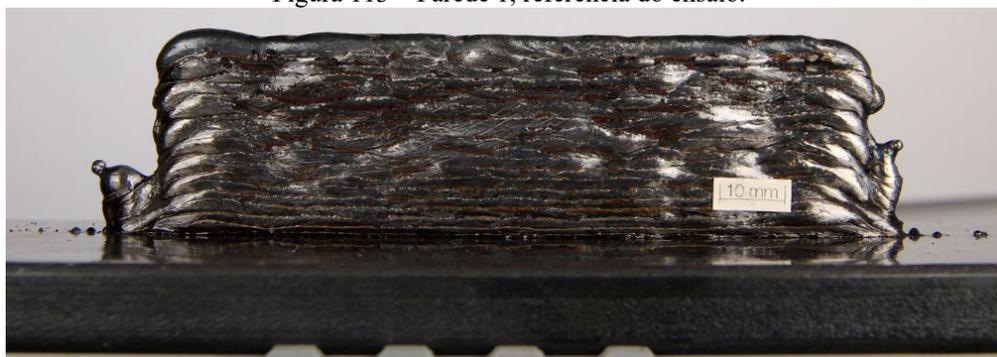
Tabela 18 - Resultados da parede de referência

| Camada | Frequência de destacamento (Hz) | Velocidade de arame (m/min) | Potência (kW) | Corrente (A) | Tensão (V) | Tempo de arco (ms) | Tempo de curto (ms) |
|--------|---------------------------------|-----------------------------|---------------|--------------|------------|--------------------|---------------------|
| 1 | 48,3 | 2,80 | 2,02 | 128,4 | 13,7 | 12,7 ± 0,9 | 8,0 ± 1,3 |
| 5 | 49,8 | 2,79 | 2,12 | 129,1 | 14,4 | 12,5 ± 1,0 | 7,6 ± 1,0 |
| 10 | 51,5 | 3,02 | 2,18 | 130,5 | 14,6 | 12,2 ± 1,0 | 7,2 ± 1,2 |
| 15 | 51,5 | 2,96 | 2,21 | 130,3 | 14,9 | 12,2 ± 1,1 | 7,2 ± 1,3 |
| 20 | 53,5 | 2,84 | 2,21 | 131,3 | 14,6 | 11,7 ± 1,2 | 7,0 ± 1,1 |

Fonte: Autor.

O resultado do ensaio de referência foi uma parede de 20 camadas com aproximadamente 30 mm de altura, Figura 113. As extremidades da parede apresentam uma deformação na altura, problema comum neste tipo de aplicação [93], [94], [95], [96], [97].

Figura 113 – Parede 1, referência do ensaio.



Fonte: Autor.

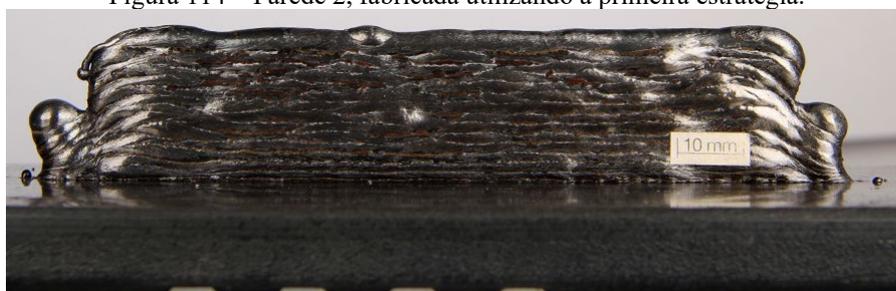
A primeira estratégia a ser avaliada consiste em manter a fonte acionada, depositando material, por 0.5 segundos ao final do cordão, Tabela 19. O resultado foi contrário ao que era esperado. Esperava-se adicionar mais material ao final do cordão e compensar a altura da parede nas suas extremidades. O que ocorreu foi uma deformação ainda maior, devido ao excesso de calor empregado, como fica visível na Figura 114. A deformação nos dois extremos da parede foi tamanha que ao fazer o cordão 16 a fonte falhou a abertura, impedindo a abertura do processo causando uma interrupção no processo.

Tabela 19 - Resultados do ensaio da primeira estratégia, 0,5 s no final de cada cordão.

| Camada | Frequência de destacamento (Hz) | Velocidade de arame (m/min) | Potência (kW) | Corrente (A) | Tensão (V) | Tempo de arco (ms) | Tempo de curto (ms) |
|--------|---------------------------------|-----------------------------|---------------|--------------|------------|--------------------|---------------------|
| 1 | 50,5 | 2,63 | 2,0 | 129,0 | 13,6 | 12,6 ± 1,0 | 7,9 ± 1,6 |
| 5 | 50,5 | 2,81 | 2,8 | 130,0 | 14,4 | 12,3 ± 1,1 | 7,5 ± 1,2 |
| 10 | 50,3 | 2,90 | 2,2 | 129,7 | 14,8 | 12,4 ± 1,0 | 7,5 ± 1,1 |
| 15 | 49,8 | 2,95 | 2,2 | 129,0 | 14,9 | 12,6 ± 1,2 | 7,5 ± 1,3 |
| 20 | - | - | - | - | - | - | - |

Fonte: Autor

Figura 114 – Parede 2, fabricada utilizando a primeira estratégia.



Fonte: Autor

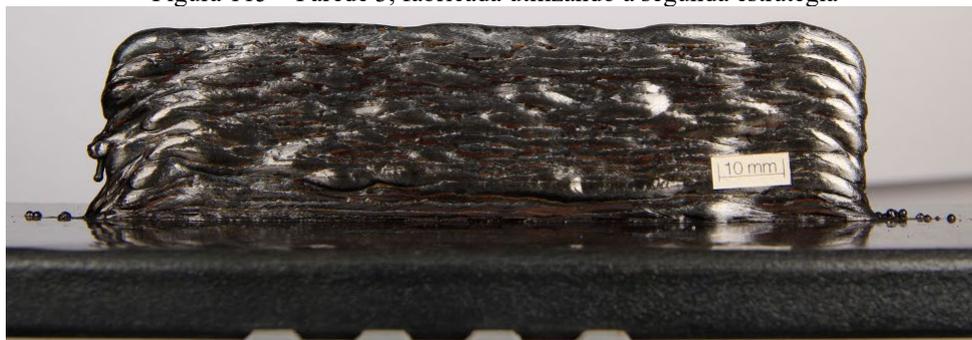
Foi possível concluir o ensaio que utiliza a segunda estratégia, em que o processo continua operando por 0,5 segundos no início do cordão. Os resultados nas diferentes camadas foram estáveis, com pouca variação, Tabela 20. Ao longo da fabricação da peça foi possível constatar uma estabilidade no processo nos extremos da parede. Ao final da construção da parede foi possível confirmar que a geometria da parede foi conservada, Figura 115. Um decaimento ainda é perceptível no topo da parede, contudo a melhora foi significativa.

Tabela 20 - Resultados do ensaio da segunda estratégia, 0,5 s no início de cada cordão

| Camada | Frequência de destacamento (Hz) | Velocidade de arame (m/min) | Potência (kW) | Corrente (A) | Tensão (V) | Tempo de arco (ms) | Tempo de curto (ms) |
|--------|---------------------------------|-----------------------------|---------------|--------------|------------|--------------------|---------------------|
| 1 | 47,6 | 2,6 | 2,0 | 127,2 | 13,7 | 12,8 ± 1,0 | 8,2 ± 1,5 |
| 5 | 47,6 | 2,7 | 2,1 | 127,7 | 14,2 | 13,0 ± 1,0 | 8,0 ± 0,9 |
| 10 | 48,8 | 2,9 | 2,1 | 128,7 | 14,4 | 12,8 ± 1,0 | 7,7 ± 1,0 |
| 15 | 47,8 | 3,0 | 2,2 | 127,9 | 14,7 | 13,0 ± 0,9 | 7,9 ± 1,0 |
| 20 | 48,3 | 2,6 | 2,1 | 128,4 | 14,2 | 12,7 ± 0,8 | 8,0 ± 0,9 |

Fonte: Autor

Figura 115 – Parede 3, fabricada utilizando a segunda estratégia



Fonte: Autor

Buscando confirmar que a segunda estratégia trouxe um benefício para o processo e também procurando apresentar o potencial da fonte MIG-AD, foi fabricado uma parede com 40, Figura 116. Nesta última parede não foram realizadas as capturas dos dados. As macros de todas as paredes foram feitas e estão apresentadas na Figura 117.

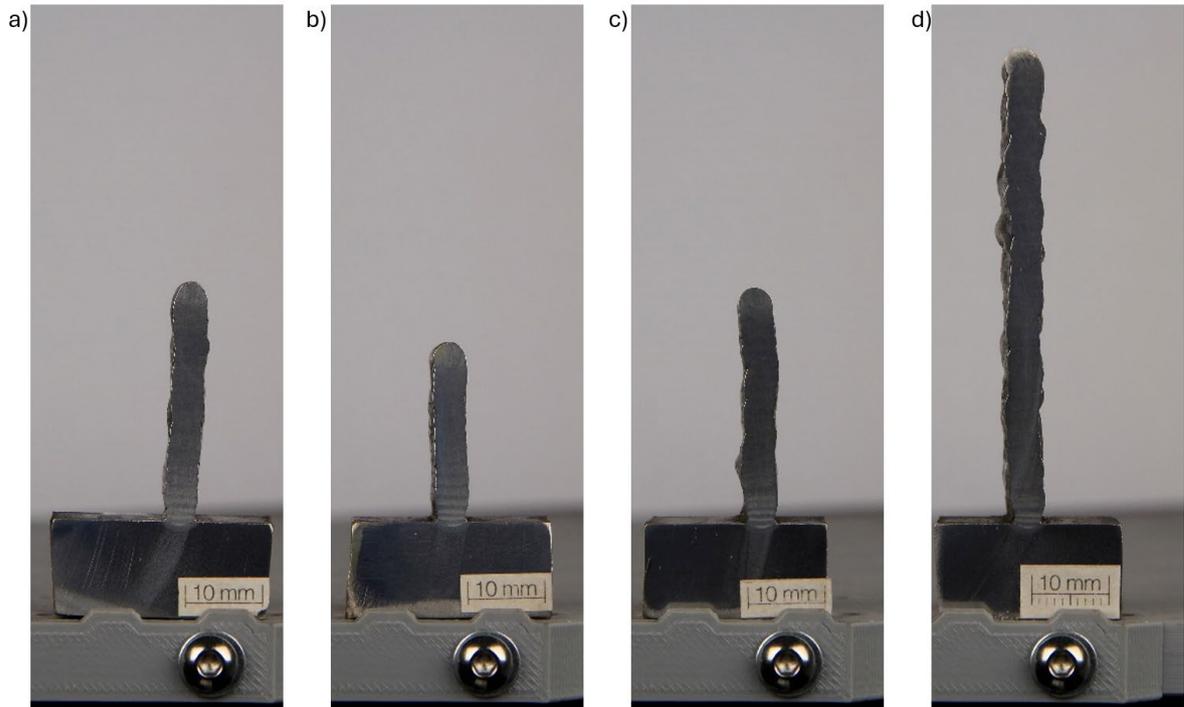
Para avaliar a regularidade na altura das paredes, foram feitas medições a cada 10 mm ao longo das paredes, utilizando um paquímetro, como ilustrado na Figura 118. Os resultados das medições estão no gráfico da Figura 119. A partir destas medições é possível constatar que foi possível manter uma regularidade na altura em todas as paredes. O início e o final de cada parede não foram apresentados neste resultado devido à dificuldade para fazer a medição nas regiões com deformação geométrica da parede 1 e 2.

Figura 116 – Parede 4, parede com 40 camadas, 60 mm de altura.



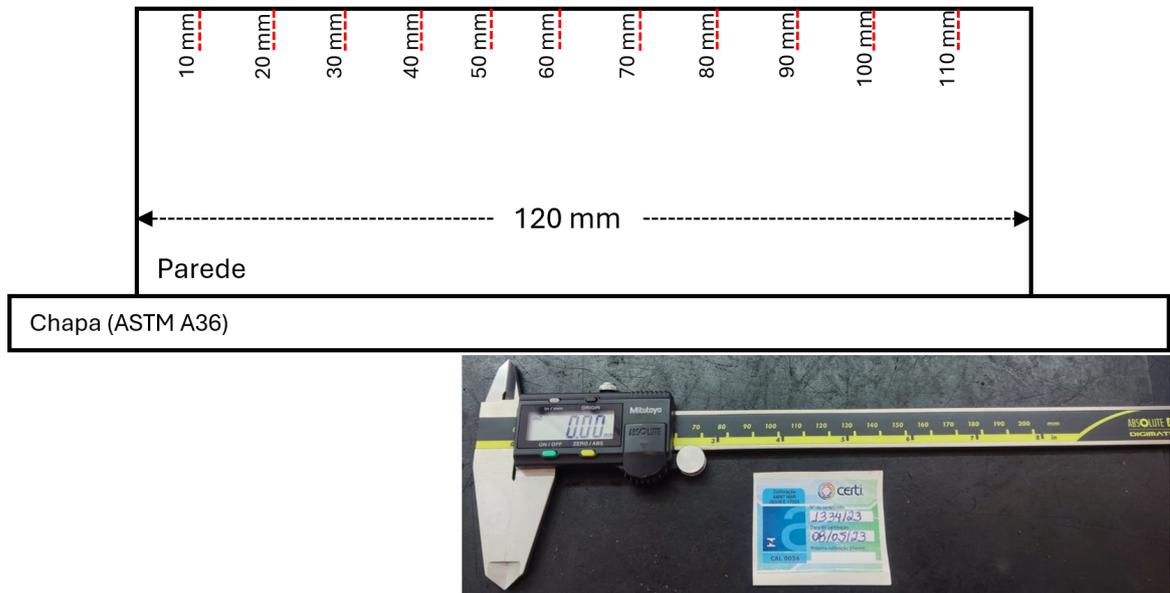
Fonte: Autor

Figura 117 - Macros das paredes com a dimensão da largura útil. a) Parede 1, parede de referência; b) Parede 2, estratégia 1; c) Parede 3, estratégia 2; d) Parede 4, 40 camadas utilizando a estratégia 2.



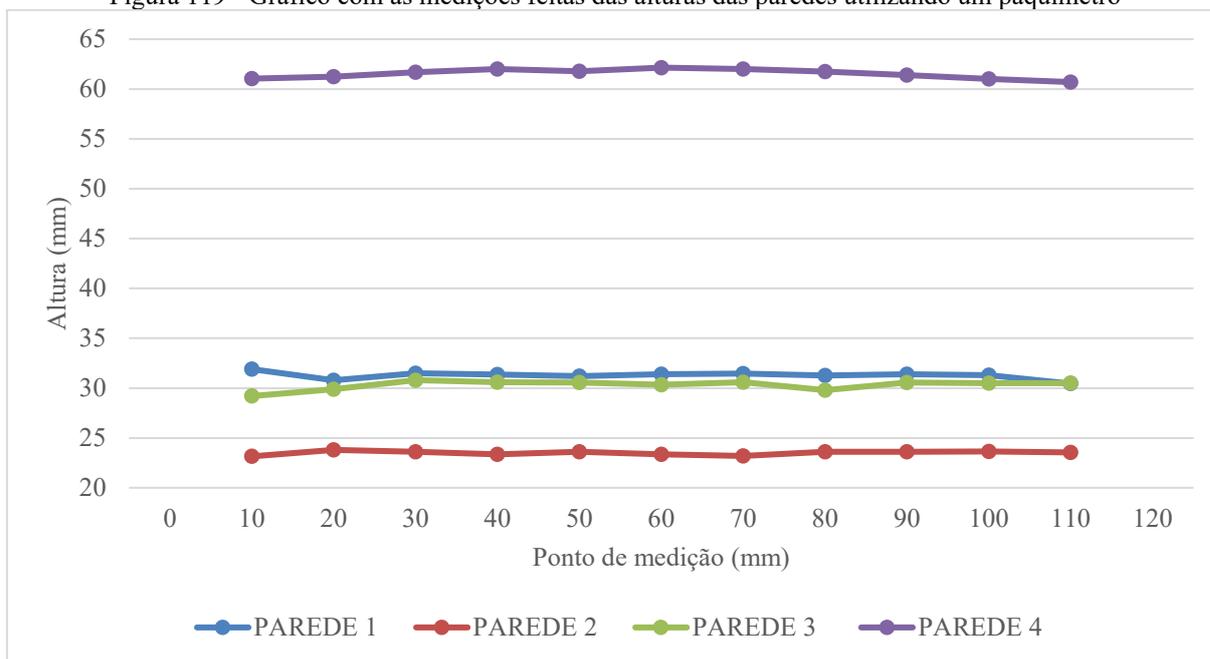
Fonte: Autor

Figura 118 - Pontos de medição das paredes com paquímetro



Fonte: Autor

Figura 119 - Gráfico com as medições feitas das alturas das paredes utilizando um paquímetro



Fonte: Autor

4.2.5.3 Considerações

O resultado do ensaio foi positivo, sendo possível confirmar que a fonte de soldagem MIG-AD está apta a desempenhar o seu papel na pesquisa e desenvolvimento de novas técnicas aplicadas ao processo WAAM.

As técnicas aplicadas e estudadas buscaram corrigir um problema comum na fabricação de paredes por WAAM, a deformação geométrica no início e no final da parede. A técnica que buscou corrigir este problema mantendo a deposição de material ao final de cada cordão mostrou-se inviável. O excesso de calor fez com que as camadas inferiores cedessem, permitindo a fabricação de apenas 15 camadas. A segunda técnica, na qual foi mantido a tocha parada por 0,5 s no início de cada cordão, enquanto a fonte depositava material, apresentou um bom resultado quando comparada com a parede de referência. Os extremos da parede obtiveram uma menor variação da altura, consequentemente, se apresentando como uma alternativa viável.

A fim de avaliar o resultado da segunda técnica, foi fabricado uma parede com o dobro de camadas, 40 camadas, atingindo uma altura superior a 60 mm. A parede manteve a geometria constante, o que reafirmou a viabilidade da utilização desta técnica.

5 CONCLUSÕES

O estudo da transferência metálica no processo GMAW-DF foi executado como almejado pelos objetivos deste trabalho. Para este feito foi desenvolvido um sistema mecatrônico de precisão integrado a uma fonte de soldagem GMAW tradicional, capaz de executar cordões de solda utilizando a alimentação dinâmica de arame. Os trabalhos realizados anteriormente a esta pesquisa foram fundamentais para os louros aqui conquistados. A fonte de soldagem GMAW completamente funcional e com o firmware aberto para alteração foi fundamental para a integração do sistema de alimentação dinâmica.

Os componentes do sistema integrado a fonte de soldagem foram exacerbadamente testados e submetidos a inúmeros ensaios, fundamentais para o entendimento do desenvolvimento aqui documentados. Problemas de ruídos causados pelo servo driver enquanto o motor está em operação foram identificados e a solução encontrada foi o desenvolvimento de um circuito integrado capaz de proteger o sinal enviado para do microcontrolador da fonte de soldagem para o servo driver.

O buffer aqui desenvolvido apresenta uma construção que proporciona uma operação mais segura, mesmo em testes, quando é possível encontrar falhas, levando a mecânica do buffer a um estresse não usual. Demonstrou-se importante isolar o sinal elétrico do arame do eixo do motor, aumentando a segurança do conjunto de servo acionamento. A versão obtida permite o seu uso em mais estudos, devido a sua forma de construção, com o rolete visível ao operador, permitindo a sua filmagem com uma câmera de alta velocidade. O grande desafio do uso do servomotor foi o seu controle preciso em frequências altas de inversão de movimento, nas quais foi necessário um estudo dedicado para encontrar parâmetros que permitissem o seu uso sem que o motor sobreaquecesse e mantivesse uma resposta satisfatória.

Na fase de arco foi possível estudar o efeito de três parâmetros: o tempo de pulso no arco, sua amplitude e a corrente de base no arco. Constatou-se que a energia contida no pulso de corrente na etapa de arco tem muita representatividade na fusão de arame. A amplitude do pulso apresentou uma relação de proporcional à velocidade de arame, sendo esta informação essencial para a futura criação de um programa sinérgico. As alterações feitas no tempo de pulso causaram problemas na reabertura do arco, resultando em períodos irregulares, indicando ser necessário ajustes na corrente da fase de curto para reduzir as variações nos tempos de arco aberto e de curto. Por fim o parâmetro de corrente de base no arco não apresentou alterações significativas, sendo utilizado em patamares reduzidos de corrente para que na ocorrência o

contato entre o arame e a poça, não exploda a ponte metálica, podendo resultar em respingos e irregularidades nos períodos.

A continuação do estudo se deu na fase de curto-circuito, onde os parâmetros de tempo e amplitude de pulso foram analisados. Este estudo evidenciou que o pulso de corrente na etapa de curto-circuito está intimamente relacionado com a regularidade da frequência de destacamento. A energia contida no pulso auxilia na estrição da ponte metálica, deixando a tarefa de romper a ponte metálica com o movimento de retorno do arame. Devido ao acesso total a todos os parâmetros do processo, foi possível realizar um ensaio sem o pulso de corrente na etapa de curto-circuito, atribuindo o valor 0 ms ao tempo de pulso no curto. Este ensaio comprovou que o arame precisa fazer movimentos maiores para conseguir romper a ponte metálica, reduzindo a frequência de destacamento. Ao aplicar muita energia no pulso, foi constatado a ocorrência de uma instabilidade, na qual um período longo era seguido de um período curto, sendo este fenômeno nomeado como *Effect of Excess Energy in Current Pulse During Short-Circuit Stage*.

O decaimento lento da corrente do pulso de na fase de arco permite uma redução na tensão superficial da poça e proporciona mais molhabilidade ao cordão. A modalidade de transferência GMAW-DF com gota flutuante, denominada Lexdrop, se apresentou repetitiva e apresentou potencial para aumento da taxa de fusão e redução de emissão de fumos.

Estes estudos apenas foram possíveis graças a fonte de soldagem MIG-AD, que permite a alteração indiscriminada de quaisquer parâmetros que se deseja. É indispensável plena flexibilidade para o desenvolvimento e evolução do processo. Após estas análises mais aprofundadas no estudo da transferência metálica, foram executadas amostras de revestimento para a validação da fonte em aplicação de revestimento, obtendo sucesso após ajustes no firmware, nas etapas de abertura e encerramento do cordão. Permitiu-se o arco ser aberto mesmo com a peça suja e sem grudar o arame no final do cordão, em um revestimento de boa qualidade superficial e baixa diluição.

Por fim, pode-se afirmar que o protótipo concebido permite mais estudos e desenvolvimento de novas técnicas de soldagem com o uso da tecnologia de alimentação dinâmica. Os desafios fundamentais para a continuação desta linha de pesquisa estão sanados, sendo inúmeros os caminhos possíveis para novos desenvolvimentos. Este trabalho se apresenta como um degrau no caminho para novas aplicações utilizando a tecnologia da alimentação dinâmica.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O resultado alcançado com a conclusão de um protótipo funcional da fonte de soldagem MIG-AD abre espaço para a realização de mais estudos envolvendo a física da transferência metálica no processo GMAW-DF. Sendo assim, abaixo estão apresentados algumas sugestões para trabalhos futuros:

- Buscando aplicar a fonte de soldagem em soluções como revestimento ou WAAM, uma sugestão apresentada é o desenvolvimento de uma tabela de parâmetros focada na velocidade de arame (VA). Assim, permitindo que usuários menos experientes consigam utilizar a fonte de soldagem MIG-AD. Este estudo se apresenta como um grande desafio, pois a busca por um conjunto de parâmetros que permita o simples ajuste da VA exigirá muitos ensaios.
- Para avaliar as aplicações do modo de transferência Lexdrop, é necessário mais ensaios buscando maior repetibilidade deste modo de transferência. Assim, podendo aplicar este modo de transferência em revestimento e WAAM.
- O protótipo atual da tocha apresenta características funcionais para ensaios em laboratório. Sendo assim, uma sugestão para um trabalho futuro é o desenvolvimento de uma versão mais robusta para ser aplicado em campo, onde os elementos mais frágeis fiquem protegidos. O servomotor, por exemplo, pode ser refrigerado com dissipadores fixados ao longo do corpo do próprio corpo.
- A inteligência artificial pode ser um mecanismo incorporado ao sistema da fonte de soldagem atual. Pode-se transmitir os valores de tensão e corrente por comunicação serial para um computador externo e este por sua vez fazer um tratamento dos dados para avaliar parâmetros como repetibilidade e VA. Utilizando a mesma comunicação serial, pode-se programar um sistema em malha fechada para alterar os parâmetros de tensão, corrente e velocidade de arame. Este sistema em malha fechada com a inteligência artificial pode avaliar muitas combinações de parâmetros. Para iniciar esta implementação o código desenvolvido em Matlab para análise dos dados pode ser utilizado como base para alimentar a inteligência artificial.
- A equipamento utilizado para o desenvolvimento do MIG-AD já apresenta problemas devidos à idade do equipamento. Assim, a sugestão é transferir o sistema atual para uma fonte de soldagem nova, evitando assim problemas de mau contato.

REFERÊNCIAS

- [1] SILVA, “Soldagem Mig/Mag Em Transferência Metálica Por Curto- Circuito Controlado Aplicada Ao Passe De Raiz,” p. 127, 2005.
- [2] Z. Wang, S. Zimmer-Chevret, F. Léonard, and G. Abba, “Prediction of bead geometry with consideration of interlayer temperature effect for CMT-based wire-arc additive manufacturing,” *Welding in the World*, vol. 65, no. 12, pp. 2255–2266, Dec. 2021, doi: 10.1007/s40194-021-01192-2.
- [3] H. T. Zhang, J. C. Feng, P. He, B. B. Zhang, J. M. Chen, and L. Wang, “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: A*, vol. 499, no. 1–2, pp. 111–113, Jan. 2009, doi: 10.1016/j.msea.2007.11.124.
- [4] J. Feng, H. Zhang, and P. He, “The CMT short-circuiting metal transfer process and its use in thin aluminium sheets welding,” *Mater Des*, vol. 30, no. 5, pp. 1850–1852, May 2009, doi: 10.1016/j.matdes.2008.07.015.
- [5] J. C. Dutra, R. H. G. e Silva, and C. Marques, “Características de fusão e potência de soldagem com a transferência MIG - CMT versus MIG convencional para Alumínio 5183,” *Soldagem & Inspeção*, vol. 18, no. 1, pp. 12–18, Mar. 2013, doi: 10.1590/S0104-92242013000100003.
- [6] P. Kah, R. Suoranta, and J. Martikainen, “Advanced gas metal arc welding processes,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 67, no. 1–4, pp. 655–674, Jul. 2013, doi: 10.1007/s00170-012-4513-5.
- [7] S. Jing, W. Kehong, Z. Qi, Z. Deku, H. Jun, and L. Guangle, “Microstructure Characteristics and Properties of Mg/Al Dissimilar Metals Made by Cold Metal Transfer Welding with ER4043 Filler Metal,” *Rare Metal Materials and Engineering*, vol. 42, no. 7, pp. 1337–1341, Jul. 2013, doi: 10.1016/S1875-5372(13)60081-8.
- [8] J. C. Dutra, R. H. G. e Silva, C. Marques, and A. B. Viviani, “A new approach for MIG/MAG cladding with Inconel 625,” *Welding in the World*, vol. 60, no. 6, pp. 1201–1209, Nov. 2016, doi: 10.1007/s40194-016-0371-3.
- [9] M. R. Karimi, S. H. Wang, and J. Jelovica, “Taguchi-based experimental investigation into weld cladding of Ni-WC MMC overlays by CMT process,” *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 122, no. 5–6, pp. 2433–2461, Sep. 2022, doi: 10.1007/s00170-022-09816-7.

- [10] C. G. Pickin, S. W. Williams, and M. Lunt, “Characterisation of the cold metal transfer (CMT) process and its application for low dilution cladding,” *J Mater Process Technol*, vol. 211, no. 3, pp. 496–502, Mar. 2011, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2010.11.005.
- [11] BMW Group, “Neuer Technologie-Campus für 3D-Druck eröffnet: BMW Group baut auf additive Fertigung und bündelt Kompetenzen an einem Standort.” Accessed: Oct. 30, 2024. [Online]. Available: <https://www.press.bmwgroup.com/deutschland/article/detail/T0309872DE/neuer-technologie-campus-fuer-3d-druck-eroeffnet:-bmw-group-baut-auf-additive-fertigung-und-buendelt-kompetenzen-an-einem-standort>
- [12] A. Benoit, S. Jobez, P. Paillard, V. Klosek, and T. Baudin, “Study of Inconel 718 weldability using MIG CMT process,” *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 16, no. 6, pp. 477–482, Aug. 2011, doi: 10.1179/1362171811Y.0000000031.
- [13] M. Rozmus-Górnikowska, Ł. Cieniek, M. Blicharski, and J. Kusiński, “Microstructure and Microsegregation of an Inconel 625 Weld Overlay Produced on Steel Pipes by the Cold Metal Transfer Technique,” *Archives of Metallurgy and Materials*, vol. 59, no. 3, pp. 1081–1084, Oct. 2014, doi: 10.2478/amm-2014-0185.
- [14] Y. Zhong, Z. Zheng, J. Li, and C. Wang, “Fabrication of 316L nuclear nozzles on the main pipeline with large curvature by CMT wire arc additive manufacturing and self-developed slicing algorithm,” *Materials Science and Engineering A*, vol. 820, no. June, p. 141539, 2021, doi: 10.1016/j.msea.2021.141539.
- [15] W. Wistance and J. Lee, “Additive Manufacturing Metal 3D Printing for the Marine and Offshore Sector - Paving the Path from Lab into the Field,” in *Day 3 Thu, March 22, 2018*, OTC, Mar. 2018, pp. 20–23. doi: 10.4043/28465-MS.
- [16] C. Marques, A. S. Pereira, R. H. G. Silva, D. Galeazzi, and I. O. Pigozzo, “Analysis of the solid wire dip in the GMAW-CMT melting pool as a means for enhancing additive manufacturing,” *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 45, no. 3, Mar. 2023, doi: 10.1007/s40430-023-04054-8.
- [17] BMW Group, “BMW Group innovative production of vehicle components using the WAAM process.” Accessed: Oct. 30, 2024. [Online]. Available: <https://www.press.bmwgroup.com/deutschland/article/detail/T0440484DE/bmw-group-mit-%E2%80%9Ee-hesse-m-draht%E2%80%9C-zu-innovativer-fertigung-von-fahrzeugbauteilen-im-waam-verfahren>

- [18] R. H. G. e Silva *et al.*, “TIG welding process with dynamic feeding: a characterization approach,” *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 96, no. 9–12, pp. 4467–4475, Jun. 2018, doi: 10.1007/s00170-018-1929-6.
- [19] M. Wilson, “TIP TIG: New technology for welding,” *Industrial Robot*, vol. 34, no. 6, pp. 462–466, 2007, doi: 10.1108/01439910710832057.
- [20] J. Norrish and D. Cuiuri, “The controlled short circuit GMAW process: A tutorial,” *J Manuf Process*, vol. 16, no. 1, pp. 86–92, Jan. 2014, doi: 10.1016/j.jmapro.2013.08.006.
- [21] C. 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,” 2017.
- [22] A. G. Rodrigues, “Desenvolvimento De Um Sistema Flexível De Alimentação Dinâmica Aplicado Em Soldagem Mig/Mag,” p. 162, 20179, [Online]. Available: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/186602/PPAU0156-D.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>
- [23] C. G. Pickin, S. W. Williams, and M. Lunt, “Characterisation of the cold metal transfer (CMT) process and its application for low dilution cladding,” *J Mater Process Technol*, vol. 211, no. 3, pp. 496–502, Mar. 2011, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2010.11.005.
- [24] N. E. Imoudu, Y. Z. Ayele, and A. Barabadi, “The characteristic of cold metal transfer (CMT) and its application for cladding,” in *2017 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*, IEEE, Dec. 2017, pp. 1883–1887. doi: 10.1109/IEEM.2017.8290218.
- [25] R. FOKENS, “Cold Metal Transfer - CMT - A Revolution in Mechanized Root Pass Pipeline Welding,” in *4th Pipeline Technology Conference 2009*, Hannover, Apr. 2009, pp. 22–23.
- [26] J. H. Choi, J. Lee, and C. D. Yoo, “Dynamic force balance model for metal transfer analysis in arc welding,” *J Phys D Appl Phys*, vol. 34, no. 17, pp. 2658–2664, 2001, doi: 10.1088/0022-3727/34/17/313.
- [27] Y. Ogino, Y. Hirata, and S. Asai, “Discussion of the Effect of Shielding Gas and Conductivity of Vapor Core on Metal Transfer Phenomena in Gas Metal Arc Welding by Numerical Simulation,” *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, vol. 40, no. 5, pp. 1109–1126, 2020, doi: 10.1007/s11090-020-10102-1.
- [28] F. D. H. Wainer, Emílio; Brandi, Sérgio Duarte; de Mello, *SOLDAGEM: Processos e metalurgia*. São Paulo, 1992.

- [29] R. H. G. E Silva, L. E. D. S. Paes, R. C. Barbosa, F. Sartori, and M. B. Schwedersky, “Assessing the effects of solid wire electrode extension (Stick out) increase in MIG/MAG welding,” *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 40, no. 1, 2018, doi: 10.1007/s40430-017-0948-9.
- [30] R. H. G. E. Silva and J. C. Dutra, “Controlled short-circuiting MIG/MAG welding (CCC) - Process analysis tools,” *Welding and Cutting*, vol. 8, no. 3, pp. 162–167, 2009.
- [31] J. C. Dutra, R. H. Gonçalves e Silva, K. C. Riffel, and C. Marques, “High-performance GMAW process for deep penetration applications,” *Welding in the World*, vol. 64, no. 6, pp. 999–1009, Jun. 2020, doi: 10.1007/s40194-020-00889-0.
- [32] R. H. G. e. Silva, D. Galeazzi, P. C. J. Rocha, A. B. Viviani, and R. A. Bernardi, “Multiple output analysis for advanced waveform and controlled short-circuit MIG/MAG variants,” *Welding in the World*, vol. 65, no. 12, pp. 2267–2282, Dec. 2021, doi: 10.1007/s40194-021-01176-2.
- [33] C. E. I. Baixo and J. C. Dutra, “Effect of shielding gas and transfer mode on the application of 625 Alloy in Carbon steel,” *Welding International*, vol. 25, no. 12, pp. 903–909, 2011, doi: 10.1080/09507116.2010.527480.
- [34] Scotti Américo, *Soldagem MIG/MAG:melhor entendimento, melhor desempenho*, 2nd ed. São Paulo, 2014.
- [35] C. S. Wu, D. G. Zou, and J. Q. Gao, “Determining the critical transition current for metal transfer in gas metal arc welding (GMAW),” *Front Mater Sci China*, vol. 2, no. 4, pp. 397–401, 2008, doi: 10.1007/s11706-008-0059-8.
- [36] N. Martins, *Introdução à teoria da eletricidade e do magnetismo*, 2ª. São Paulo, 1975.
- [37] Y.-S. Kim and T. W. EAGAR, “Analysis of Metal Transfer in Gas Metal Arc Welding,” *Weld J*, pp. 269–278, 1993.
- [38] Jair Carlos Dutra, *Ciência e Tecnologia da Soldagem a Arco Voltaico*. Florianópolis, 2023.
- [39] R. F. Fagundes, J. B. Zanini, P. C. J. Rocha, R. H. G. e. Silva, and R. M. do Nascimento, “Influência do diâmetro de gota do processo MIG/MAG pulsado com alta penetração,” p. 7, 2018.
- [40] J. Hu and H. L. Tsai, “Effects of current on droplet generation and arc plasma in gas metal arc welding,” *J Appl Phys*, vol. 100, no. 5, 2006, doi: 10.1063/1.2337261.
- [41] J. Ashby *et al.*, *The Physics of Welding*. 1986. doi: 10.1016/c2013-0-03805-4.

- [42] L. A. Jones, T. W. Eagar, and J. H. Lang, "A dynamic model of drops detaching from a gas metal arc welding electrode," *J Phys D Appl Phys*, vol. 31, no. 1, pp. 107–123, 1998, doi: 10.1088/0022-3727/31/1/014.
- [43] K. Li, Z. Wu, and C. Liu, "Measurement and calculation of plasma drag force in arc welding based on high-speed photography technology and particle dynamics," *Mater Des*, vol. 85, pp. 97–101, 2015, doi: 10.1016/j.matdes.2015.06.156.
- [44] J. Haidar, "The dynamic effects of metal vapour in gas metal arc welding," *J Phys D Appl Phys*, vol. 43, no. 16, 2010, doi: 10.1088/0022-3727/43/16/165204.
- [45] I. S. Kim and A. Basu, "A mathematical model of heat transfer and fluid flow in the gas metal arc welding process," *J Mater Process Technol*, vol. 300, no. 3–4, pp. 17–24, 1998, doi: 10.1016/s0924-0136(97)00383-x.
- [46] J. Al-Karawi and J. Schmidt, "Application of infrared thermography to the analysis of welding processes," pp. 1–6, 2004, doi: 10.21611/qirt.2004.077.
- [47] Y. Ogino and Y. Hirata, "Numerical simulation of metal transfer in argon gas-shielded GMAW," *Welding in the World*, vol. 59, no. 4, pp. 465–473, 2015, doi: 10.1007/s40194-015-0221-8.
- [48] M. Hertel, S. Rose, and U. Füssel, "Numerical simulation of arc and droplet transfer in pulsed GMAW of mild steel in argon," *Welding in the World*, vol. 60, no. 5, pp. 1055–1061, 2016, doi: 10.1007/s40194-016-0362-4.
- [49] J.-K. Xiao, Lei; Fan, Ding; Huang, "Three-dimensional Numerical Study on the Metal Rotating Spray Transfer Process of High-current GMAW," pp. 1–14, 2020.
- [50] Y. Ogino, S. Asai, and Y. Hirata, "Visualization of arc plasma and molten wire behavior in CO₂ arc welding process by three-dimensional numerical simulation," *Welding in the World*, vol. 64, no. 10, pp. 1789–1797, 2020, doi: 10.1007/s40194-020-00958-4.
- [51] R. Kozakov *et al.*, "Spatial structure of the arc in a pulsed GMAW process," *J Phys D Appl Phys*, vol. 46, no. 22, Jun. 2013, doi: 10.1088/0022-3727/46/22/224001.
- [52] D. Galeazzi, R. H. G. e. Silva, A. B. Viviani, P. R. Jaeger, and M. B. Schwedersky, "Evaluation of thermal and geometric properties of martensitic stainless steel thin walls built by additive manufacturing cold metal transfer (CMT) processes," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, no. 0123456789, 2022, doi: 10.1007/s00170-022-08921-x.

- [53] R. H. Gonçalves e Silva, K. Correa Riffel, M. Pompermaier Okuyama, and G. Dalpiaz, “Effect of dynamic wire in the GTAW process,” *J Mater Process Technol*, vol. 269, no. December 2018, pp. 91–101, 2019, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2019.01.033.
- [54] A. G. M. Santos *et al.*, “Processo MIG / MAG com Eletrodo Rotativo : Investigação das Variações Geométricas Mediante a Distintas Frequências .,” *Consolda*, pp. 1–8, 2018.
- [55] M. B. Rodrigues, R. G. N. Silva, M. Pereira, R. H. G. e Silva, and E. W. Teichmann, “Effect of dynamic wire feeding on deposition quality in laser cladding process,” *J Laser Appl*, vol. 32, no. 2, p. 022065, 2020, doi: 10.2351/7.0000097.
- [56] R. Balola, “Princípios Matemáticos da Filosofia Natural: A lei de inércia,” *Tese Mestrado*, 2010.
- [57] I. Newton, *PRINCIPIA: Princípios Matemáticos de Filosofia Natural Livro 1*, 2ª Ed. 3. São Paulo, 2016.
- [58] D. Galeazzi, R. H. G. e Silva, I. O. Pigozzo, A. F. da Rosa, A. S. Pereira, and C. Marques, “Analysis of current pulse during short-circuit phase in CMT version of GMAW process under a view of additive manufacturing,” *Welding in the World*, vol. 66, no. 7, pp. 1369–1380, Jul. 2022, doi: 10.1007/s40194-022-01298-1.
- [59] C. G. Pickin, S. W. Williams, and M. Lunt, “Characterisation of the cold metal transfer (CMT) process and its application for low dilution cladding,” *J Mater Process Technol*, vol. 211, no. 3, pp. 496–502, Mar. 2011, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2010.11.005.
- [60] N. E. Imoudu, Y. Z. Ayele, and A. Barabadi, “The characteristic of cold metal transfer (CMT) and its application for cladding,” in *2017 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*, IEEE, Dec. 2017, pp. 1883–1887. doi: 10.1109/IEEM.2017.8290218.
- [61] H. T. Zhang, J. C. Feng, and P. He, “Interfacial phenomena of cold metal transfer (CMT) welding of zinc coated steel and wrought aluminium,” *Materials Science and Technology*, vol. 24, no. 11, pp. 1346–1349, Nov. 2008, doi: 10.1179/174328407X213152.
- [62] S. Niu *et al.*, “Microstructure and Properties of Lap Joint Between Aluminum Alloy and Galvanized Steel by CMT,” *J Mater Eng Perform*, vol. 25, no. 5, pp. 1839–1847, May 2016, doi: 10.1007/s11665-016-2035-2.
- [63] J. Lin, N. Ma, Y. Lei, and H. Murakawa, “Shear strength of CMT brazed lap joints between aluminum and zinc-coated steel,” *J Mater Process Technol*, vol. 213, no. 8, pp. 1303–1310, 2013, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2013.02.011.

- [64] R. Cao, Q. Huang, J. H. Chen, and P. C. Wang, “Cold metal transfer spot plug welding of AA6061-T6-to-galvanized steel for automotive applications,” *J Alloys Compd*, vol. 585, pp. 622–632, 2014, doi: 10.1016/j.jallcom.2013.09.197.
- [65] G. Pardal, S. Ganguly, S. Williams, and J. Vaja, “Dissimilar metal joining of stainless steel and titanium using copper as transition metal,” *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 86, no. 5–8, pp. 1139–1150, Sep. 2016, doi: 10.1007/s00170-015-8110-2.
- [66] R. Cao, J. H. Sun, and J. H. Chen, “Mechanisms of joining aluminium A6061-T6 and titanium Ti-6Al-4V alloys by cold metal transfer technology,” *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 18, no. 5, pp. 425–433, Jul. 2013, doi: 10.1179/1362171813Y.0000000118.
- [67] Z. Liu *et al.*, “A Comparative Study on Microstructure, Mechanical Properties and Corrosion Resistance of M390 and 304 with Different Welding Methods,” *J Mater Eng Perform*, 2023, doi: 10.1007/s11665-023-08523-y.
- [68] Arthur Gustavo Moreira Santos, “Análise da influência da rotação do eletrodo no processo MIG/MAG e estudo para aplicação em soldagem narrow gap,” 2019, Accessed: Oct. 30, 2024. [Online]. Available: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/215248>
- [69] V. Vara Prasad, C. Madhu Babu, and P. Ajay, “A Review on Rotating Arc Welding Process,” *Mater Today Proc*, vol. 5, no. 2, pp. 3551–3555, 2018, doi: 10.1016/j.matpr.2017.11.603.
- [70] N. Guo, S. B. Lin, C. Gao, C. L. Fan, and C. L. Yang, “Study on elimination of interlayer defects in horizontal joints made by rotating arc narrow gap welding,” *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 14, no. 6, pp. 584–588, Aug. 2009, doi: 10.1179/136217109X456942.
- [71] H. Zhang, J. Liu, Q. Chang, H. Lu, H. Wu, and J. Feng, “A novel rotating wire GMAW process to change fusion zone shape and microstructure of mild steel,” *Mater Lett*, vol. 123, pp. 101–103, Mar. 2014, doi: 10.1016/j.matlet.2014.03.018.
- [72] X. Zhang, H. Gao, and G. Zhang, “Current-independent metal transfer by utilizing droplet resonance in gas metal arc welding,” *J Mater Process Technol*, vol. 279, no. 92, 2020, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2019.116571.
- [73] V. Jorge, “Concepção e avaliação de uma técnica de pulsação da alimentação de arame baseada em um ‘pulmão ativo’ para soldagem MIG/MAG,” p. 182, 2020, [Online]. Available: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/30298>

- [74] I. G. Machado, *Soldagem e técnicas conexas: Processos*. Porto Alegre, 1996.
- [75] M. Schnick, U. Füssel, M. Hertel, A. Spille-Kohoff, and A. B. Murphy, “Metal vapour causes a central minimum in arc temperature in gas-metal arc welding through increased radiative emission,” *J Phys D Appl Phys*, vol. 43, no. 2, 2010, doi: 10.1088/0022-3727/43/2/022001.
- [76] R. H. G. e. Silva, C. Godinho, K. C. Riffel, L. C. Maia, M. O. Skiwrinski, and R. A. Bernardi, “SOLDAGEM MIG/MAG COM CORRENTE PULSADA PARA APLICAÇÃO EM PASSE DE RAIZ,” 2017, *9º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, Joinville*.
- [77] Q. L. Lin, G. J. Mao, Q. Huang, R. Cao, and J. H. Chen, “Effect of Zn Vaporization on Wetting of Al-galvanized Steel in Cold Metal Transfer Process,” *Journal of Iron and Steel Research International*, vol. 23, no. 6, pp. 566–572, 2016, doi: 10.1016/S1006-706X(16)30089-9.
- [78] N. T. Jenkins, P. F. Mendez, and T. W. Eagar, “Effect of Arc Welding Electrode Temperature on Vapor and Fume Composition.”
- [79] ESAB BR, “Soldagem MIG / MAG,” in *Soldagem MIG/MAG*, 2005, p. 135.
- [80] T. Era, A. Ide, T. Uezono, T. Ueyama, and Y. Hirata, “Controlled bridge transfer (CBT) gas metal arc process for steel sheets joining,” *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 14, no. 6, pp. 493–499, Aug. 2009, doi: 10.1179/136217109X406965.
- [81] M. Bruce and D. Deruntz, “Assessing the Benefits of Surface Tension Transfer Welding to Industry,” 2003. [Online]. Available: www.nait.org
- [82] B. Mvola, P. Kah, and P. Layus, “Review of current waveform control effects on weld geometry in gas metal arc welding process,” *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 96, no. 9–12, pp. 4243–4265, 2018, doi: 10.1007/s00170-018-1879-z.
- [83] J. C. Dutra, R. H. Gonçalves e Silva, and C. Marques, “Melting and welding power characteristics of MIG–CMT versus conventional MIG for aluminium 5183,” *Welding International*, vol. 29, no. 3, pp. 181–186, 2015, doi: 10.1080/09507116.2014.932974.
- [84] S. F. Goecke, A. A. Syed, M. Ebert-Spiegel, and A. De, “Probing current, voltage and metal transfer characteristics in pulsed arc and in conventional and a novel low energy input short arc GMAW,” *Yosetsu Gakkai Ronbunshu/Quarterly Journal of the Japan Welding Society*, vol. 31, no. 4, 2013, doi: 10.2207/qjjws.31.26s.

- [85] B. Mezrag, F. Deschaux-Beaume, and M. Benachour, “Control of mass and heat transfer for steel/ aluminium joining using cold metal transfer process,” *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 20, no. 3, pp. 189–198, 2015, doi: 10.1179/1362171814Y.0000000271.
- [86] Y. Sato, S. Eda, Y. Ogino, and S. Asai, “Numerical simulation of liquid bridge breakup in short-circuit transfer process,” *Welding in the World*, vol. 66, no. 1, pp. 117–133, Jan. 2022, doi: 10.1007/s40194-021-01202-3.
- [87] A. Traidia, F. Roger, E. Guyot, J. Schroeder, and G. Lubineau, “Hybrid 2D-3D modelling of GTA welding with filler wire addition,” *Int J Heat Mass Transf*, vol. 55, no. 15–16, pp. 3946–3963, Jul. 2012, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.03.025.
- [88] N. Back, *Projeto integrado de produtos: Planejamento, Concepção E Modelagem*.
- [89] Daniel Galeazzi, “Desenvolvimento de um Sistema Integrado de Manufatura Aditiva Por Deposição a Arco Usando a Variante GMAW Com Alimentação Dinâmica CMT,” UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA, Florianópolis, 2024.
- [90] Kollmorgen, “AKD™, AKD™ BASIC, AKD™ PDMM Manual de Instalação.” Accessed: Jul. 31, 2021. [Online]. Available: kdn.kollmorgen.com
- [91] P. Kołodziejczak, M. Bober, and T. Chmielewski, “Wear Resistance Comparison Research of High-Alloy Protective Coatings for Power Industry Prepared by Means of CMT Cladding,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 12, no. 9, May 2022, doi: 10.3390/app12094568.
- [92] K. He *et al.*, “Comparison on the microstructure and corrosion behavior of Inconel 625 cladding deposited by tungsten inert gas and cold metal transfer process,” *Surf Coat Technol*, vol. 435, Apr. 2022, doi: 10.1016/j.surfcoat.2022.128245.
- [93] A. L. B. Novelino, G. C. Carvalho, and M. Ziberov, “Influence of WAAM-CMT deposition parameters on wall geometry,” *Advances in Industrial and Manufacturing Engineering*, vol. 5, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.aime.2022.100105.
- [94] G. G. de Sousa Figueiredo, I. B. de Mello Picchi, M. Lima dos Santos, E. A. T. López, J. P. Oliveira, and T. F. de Abreu Santos, “Parametric study and response optimization for the wire + arc additive manufacturing of 316LSi via pulsed GMAW,” *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 129, no. 7–8, pp. 3073–3092, Dec. 2023, doi: 10.1007/s00170-023-12470-2.

- [95] D. Ding, Z. Pan, D. Cuiuri, and H. Li, “A practical path planning methodology for wire and arc additive manufacturing of thin-walled structures,” *Robot Comput Integr Manuf*, vol. 34, pp. 8–19, 2015, doi: 10.1016/j.rcim.2015.01.003.
- [96] V. Mishra, C. Ayas, and M. Langelaar, “Design for material properties of additively manufactured metals using topology optimization,” *Mater Des*, vol. 235, p. 112388, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.matdes.2023.112388.
- [97] R. Ranjan, M. Langelaar, F. Van Keulen, and C. Ayas, “Classification and analysis of common simplifications in part-scale thermal modelling of metal additive manufacturing processes,” *Adv Model Simul Eng Sci*, vol. 10, no. 1, p. 15, Nov. 2023, doi: 10.1186/s40323-023-00253-z.

APÊNDICE 1 – Projeto detalhado do buffer

Quando este trabalho teve início o buffer utilizado até então apresentava um problema crônico de extravasar arame. O problema era constatado em situações em que o arco se extinguía precocemente ou quando o alimentador enchia o buffer por diferentes problemas. A continuação do desenvolvimento da tecnologia MIG-AD não seria fácil com este problema no buffer, tornando-se necessário a construção de um novo buffer capaz de suportar as diversidades dos ensaios.

Utilizando o buffer desenvolvido na dissertação [22] como referência e utilizando a sistemática de desenvolvimento de produto [88], obteve-se um projeto de buffer que impede a saída do arame pelo buffer mesmo em situações adversas, muito comuns durante o desenvolvimento do processo. Os principais aspectos do novo buffer estão em destaque na Figura 120 e Figura 121. Os pontos de fixação por parafuso foram dimensionados de maneira a exigir o mínimo possível de resistência a fadiga por parte das peças impressas em PLA (ácido poliláctico). Novos fixadores, item 2, para os conduítes foram fabricados em cobre, os quais permitiram maior amplitude de trabalho da alavanca do buffer sem criar resistência para o movimento do conduíte do buffer. O suporte para o mangote tornou permitiu maior praticidade na instalação do buffer, evitando problemas com o mangote durante a operação da fonte.

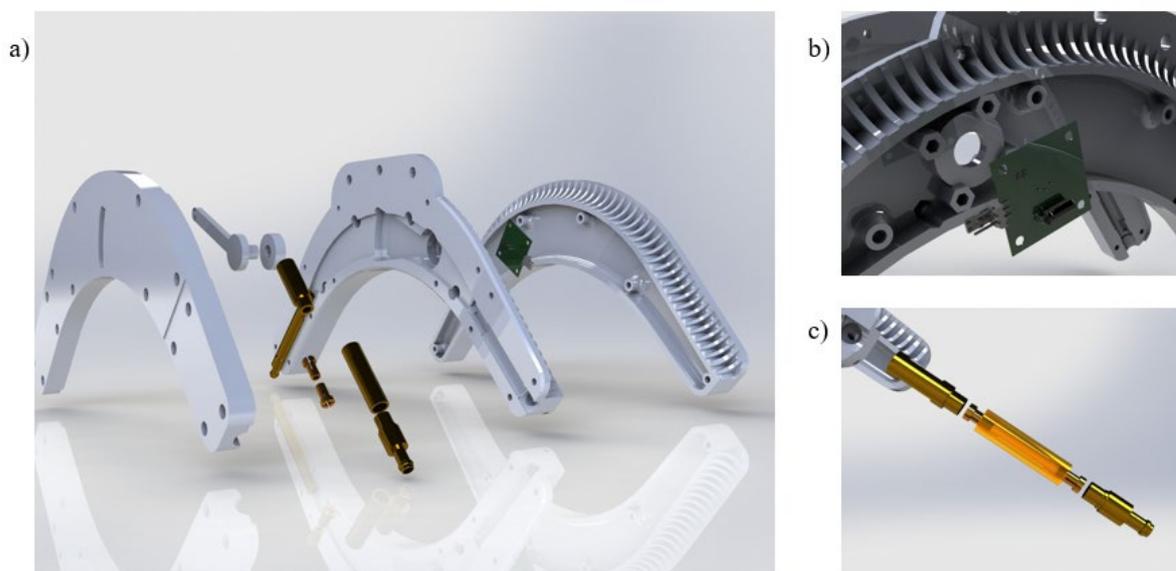
Figura 120 - Segunda versão do buffer com destaque as principais modificações.



| | |
|---|-------------------------------------------------|
| 1 | Pontos de fixação por parafuso com a tampa. |
| 2 | Dispositivo para fixação do conduíte do buffer. |
| 3 | Suporte com ranhuras para mangote. |

Fonte: Autor.

Figura 121 - Buffer a) Vista explodida dos componentes que compõem o buffer; b) Placa de circuito impresso do sensor e c) Detalhes dos componentes de fixação do condúite.



Fonte: Autor.

A condução dos testes após a implementação desta versão do buffer manifestou resultados positivos no processo, possibilitando a reprodução de inúmeros experimentos sem a sua interrupção.

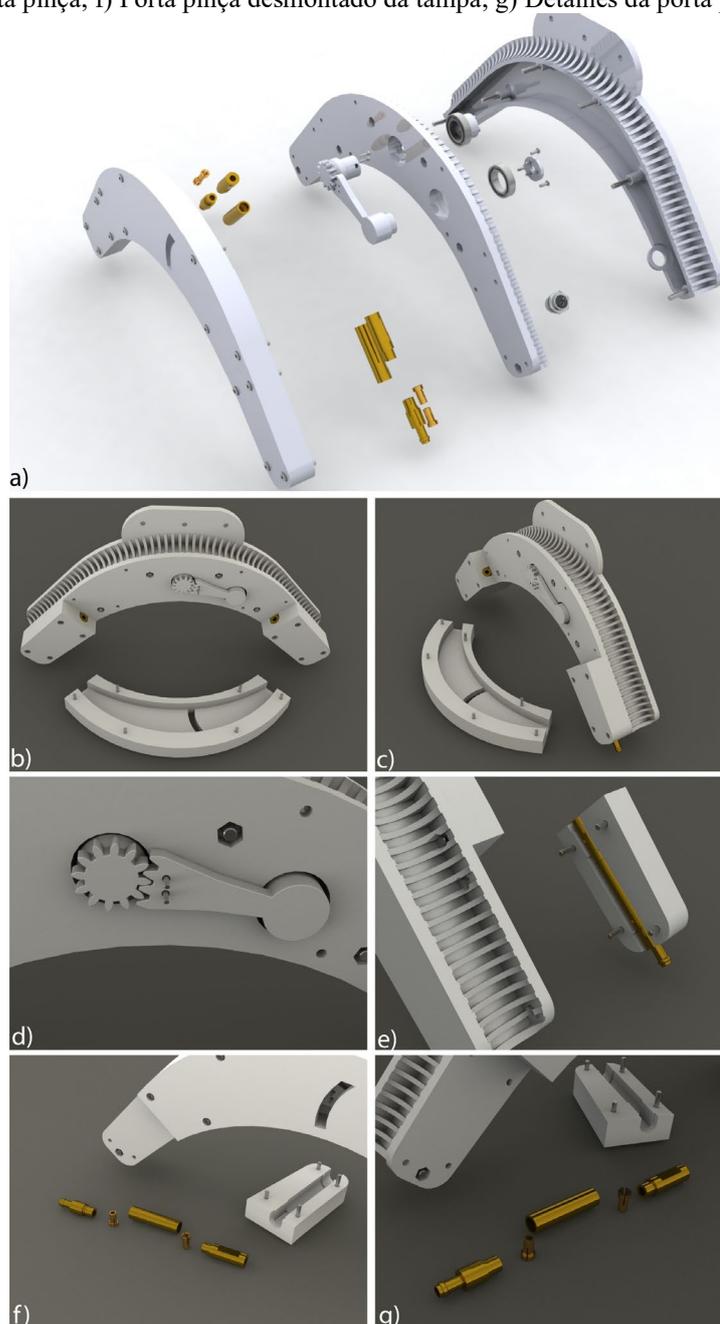
Após muitos ensaios com o buffer, apresentado na Figura 121, o sensor utilizado para mensurar o deslocamento angular da alavanca sofreu uma avaria. A substituição do sensor se mostrou muito complexa, devido à proximidade que o sensor precisa ter com os ímãs instalados na alavanca. Isso motivou a busca por uma alternativa ao sistema de sensoriamento baseado no efeito Hall, uma nova placa com um potenciômetro foi instalada. Junto ao potenciômetro foi desenvolvido um novo sistema de engrenagem para amplificar o movimento angular produzido pelo arame, fazendo ser necessário a fabricação de um novo buffer.

O novo buffer, atualmente utilizado na fonte MIG-AD, foi aprimorado e está em detalhes na Figura 122 a). A tampa principal foi reprojetaada, em destaque nas imagens b) e c), para que acompanhasse o canal, agora ampliado, que limita o movimento do arame, dentro do buffer.

Na imagem d) da Figura 122, o destaque está para o novo sistema de engrenagem, responsável por amplificar o movimento angular do potenciômetro. Esta atualização permite que a função programada na fonte obtivesse uma maior resolução da leitura da posição do arame. Nesta versão do buffer, o sensor é instalado na engrenagem da esquerda, enquanto na versão anterior do buffer o sensor ficava na própria alavanca, esta atualização facilitou o correto

posicionamento do potenciômetro. A imagem e) mostra como estão instalados os dispositivos porta pinça, esta atualização facilitou a troca de arame, pois agora é possível remover individualmente o dispositivo porta pinça. Nas últimas imagens da Figura 122, f) e g), estão em destaque os dispositivos porta pinça, que permitem a fixação do conduíte que chega até o buffer e o que é responsável pelo movimento dentro do buffer.

Figura 122 – Buffer atualizado. a) Vista explodida do buffer; b) Vista frontal sem a tampa principal; c) Perspectiva do buffer; d) Mecanismo de transmissão do movimento para o sensor; e) Vista da tampa de um dos porta pinça; f) Porta pinça desmontado da tampa; g) Detalhes da porta pinça.



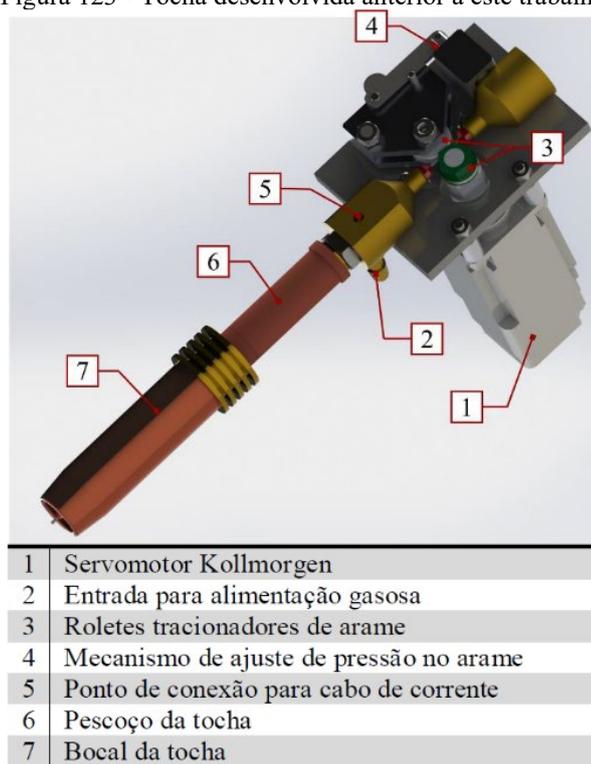
Fonte: Autor.

APÊNDICE 2 – Projeto detalhado da tocha

A tocha de soldagem em uma fonte com tecnologia de alimentação dinâmica apresenta muitos desafios. A seguir serão apresentados os desafios que foram superados ao longo do desenvolvimento deste trabalho, os protótipos desenvolvidos e os conhecimentos adquiridos ao longo do trabalho sobre a mecânica da tocha concebida para a fonte de soldagem MIG-AD. Os relatos e descobertas aqui apresentadas podem ser utilizadas para o desenvolvimento de mecanismos de alimentação dinâmica de sistemas laser e TIG.

Trabalhos anteriormente realizados no LABSOLDA foram capazes de desenvolver uma tocha de soldagem para o sistema de alimentação dinâmica, conforme ilustrado na Figura 123. Para atingir os objetivos deste trabalho, algumas características da tocha precisavam ser aperfeiçoadas, o que se apresentou como um desafio constante ao longo deste trabalho.

Figura 123 - Tocha desenvolvida anterior a este trabalho.



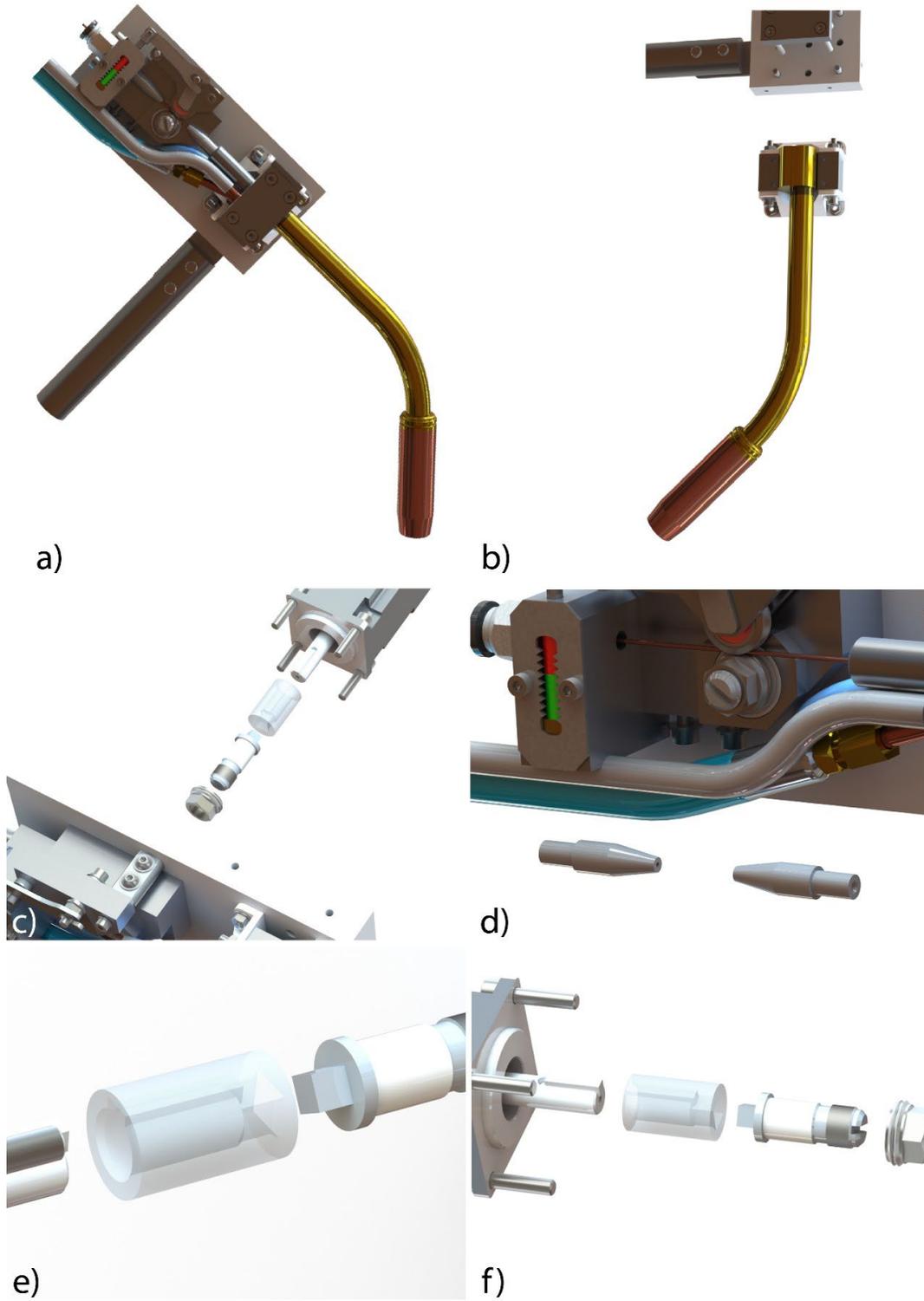
Fonte: [22]

Dentre os desafios enfrentados está a alta dinâmica de inversão do movimento que se pretende atingir, uma frequência de deposição próxima a 100 Hz, isso significa que o motor mudará o sentido do movimento do arame em até 200 vezes por segundo. Essa aplicação gera uma demanda exacerbada do servomotor, pois o motor é sobrecarregado com altos níveis de corrente para vencer a inércia e inverter o movimento, provocando seu superaquecimento.

Outro desafio é a fixação direta do rolete no eixo do motor, deixando o motor e o driver vulneráveis a descargas elétricas durante a operação da fonte de soldagem, fazendo-se necessário um isolamento elétrico entre o motor e o rolete responsável por transferir o movimento do motor ao arame. A fixação do cabo de corrente deve receber melhorias, pois o curso do parafuso de fixação do cabo na tocha é curto e o canal onde foi feita a rosca é de latão, podendo sofrer desgaste ao longo do período dos ensaios. Por último, mas não menos importante, a ausência de refrigeração da tocha que se faz necessário para o seu uso em cordões mais longos, como por exemplo em aplicações de revestimento ou MA.

O primeiro modelo de tocha desenvolvido no curso deste trabalho está ilustrado na Figura 124 a). É possível constatar um suporte em alumínio parafusado ao corpo da tocha, que pode ser utilizada para o seu uso manual ou para fixação no sistema mecânico do movimentador automático. A fim de se atender o objetivo de produzir uma versão de tocha com capacidade de operar em elevados ciclos de trabalho, neste ponto do projeto optou-se por usar um pescoço comercial, Figura 124 b), utilizado por tocha de soldagem refrigerada à água. O uso de um pescoço comercial também facilitaria a conexão elétrica para o circuito de soldagem, pois o modelo já possui conector compatível com cabos de corrente também refrigerados à água. Essa escolha foi feita por essa tocha ser refrigerada estar disponível no laboratório. O fato de o pescoço da tocha ser curvado trouxe o questionamento de que a curvatura do pescoço da tocha poderia causar interferência no movimento do arame, sendo este motivo de alguns ensaios posteriores. Ilustrado no item c) está o mecanismo responsável por transferir o movimento do motor ao rolete, isolando eletricamente o mesmo, devido ao acoplamento fabricado em impressão 3D. Os itens em destaque na imagem d) são guias responsáveis por manter o arame alinhado, garantindo a sua passagem pelo rolete, evitando que o mesmo escape durante a operação. Vale ressaltar que ao contrário da tocha da Figura 123, esta tem as guias em nylon. O item e) mostra o acoplamento do motor e destaca o formato quadrado do eixo do rolete, ao lado direito da imagem. Este eixo quadrado é encaixado ao acoplamento flexível fabricado em PLA, onde a área de contato entre estes dois elementos fica visível no item f) da Figura 124.

Figura 124 – Primeiro modelo de tocha desenvolvido. a) Tocha com suporte para pegada manual; b) Pescoço da tocha refrigerado; c) Mecanismo de acoplamento do motor ao rolete; d) Guias para o arame em nylon; e) Detalhe para o formato quadrado do eixo em aço do rolete; f) Área de contato do eixo quadrado com o acoplamento em PLA.



Fonte: Autor.

Um questionamento constante durante os experimentos foi a transmissão do movimento do eixo do motor para o arame. Atrasos no movimento do arame em relação à rotação do motor deixariam o controle do processo mais complexo ou inviável. Algumas possíveis fontes de atraso no movimento seriam, por exemplo, a folga do arame no interior do conduíte do pescoço ou folga no acoplamento entre o eixo do motor e do rolete. Para avaliar se este problema é presente foi realizado uma filmagem simultânea do arame e do rolete em operação. Para este feito, foi necessário a utilização de duas câmeras de alta velocidade conectadas ao mesmo computador, o qual enviou o disparo para início das filmagens para ambos os equipamentos de aquisição de imagens, ilustrado na Figura 125.

Figura 125 - Ilustração da bancada para filmagem simultânea do arame e do rolete responsável pelo movimento do arame.



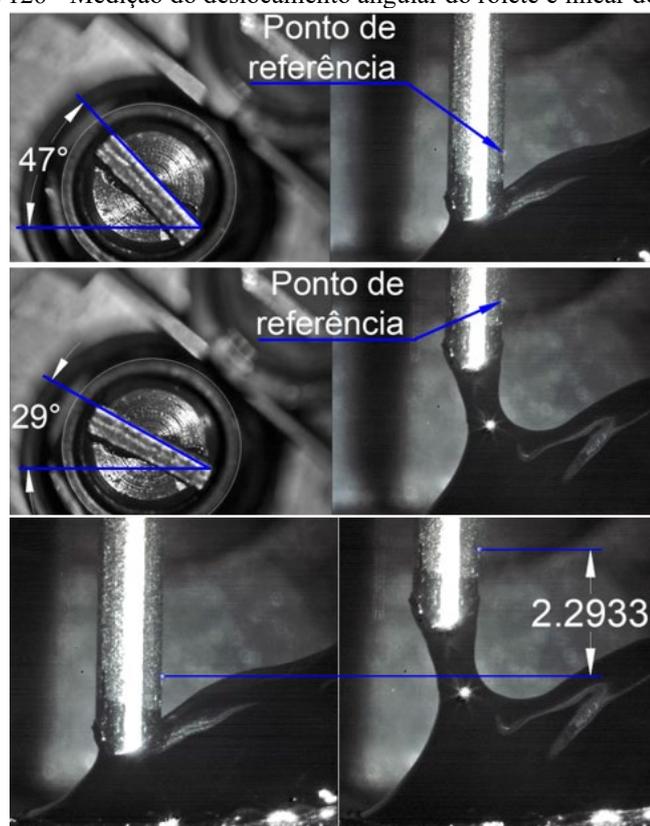
Fonte: Autor.

Para a filmagem do movimento do arame durante a soldagem foi necessário a utilização de um sistema de emissão luz laser o qual é capturado pela câmera da marca IDT, equipada com uma lente com filtros para que apenas o reflexo do laser seja capturado nas filmagens. Apesar do rolete da tocha estar próximo ao processo, foi possível filmar o movimento do mesmo apenas utilizando iluminação LED.

Após avaliar as filmagens foi possível constatar que o movimento do arame está de acordo com o movimento do rolete, contudo para apresentar o resultado utilizou-se 2 frames do

processo, o primeiro no instante 0,964 s da filmagem e o seguinte apenas 3 ms após, ambos apresentados na Figura 126. Estes frames foram escolhidos por permitir o uso de uma referência para medição do movimento do arame. Com a utilização do software AutoCAD foi possível colocar a imagem em uma escala proporcional com a realidade, com base no diâmetro do arame. O ângulo de rotação do rolete foi capturado a partir da fenda em seu eixo, enquanto para demarcar a distância entre o arame na primeira e na segunda imagem foi utilizado uma pequena deformação do arame.

Figura 126 - Medição do deslocamento angular do rolete e linear do arame.



Fonte: Autor.

Para a conversão do movimento angular para o movimento linear foi utilizada a equação 19, onde a variação linear do arame (ΔL) depende do raio do rolete ($r = 7,3 \text{ mm}$) e da variação angular do rolete $\Delta\theta$. O resultado para a ΔL , utilizando variáveis mensuradas na Figura 126, é de 2,29 mm, mesmo valor encontrado ao mensurar o movimento na Figura 126.

$$\Delta L = \frac{2\pi r * \Delta\phi}{360} \quad (19)$$

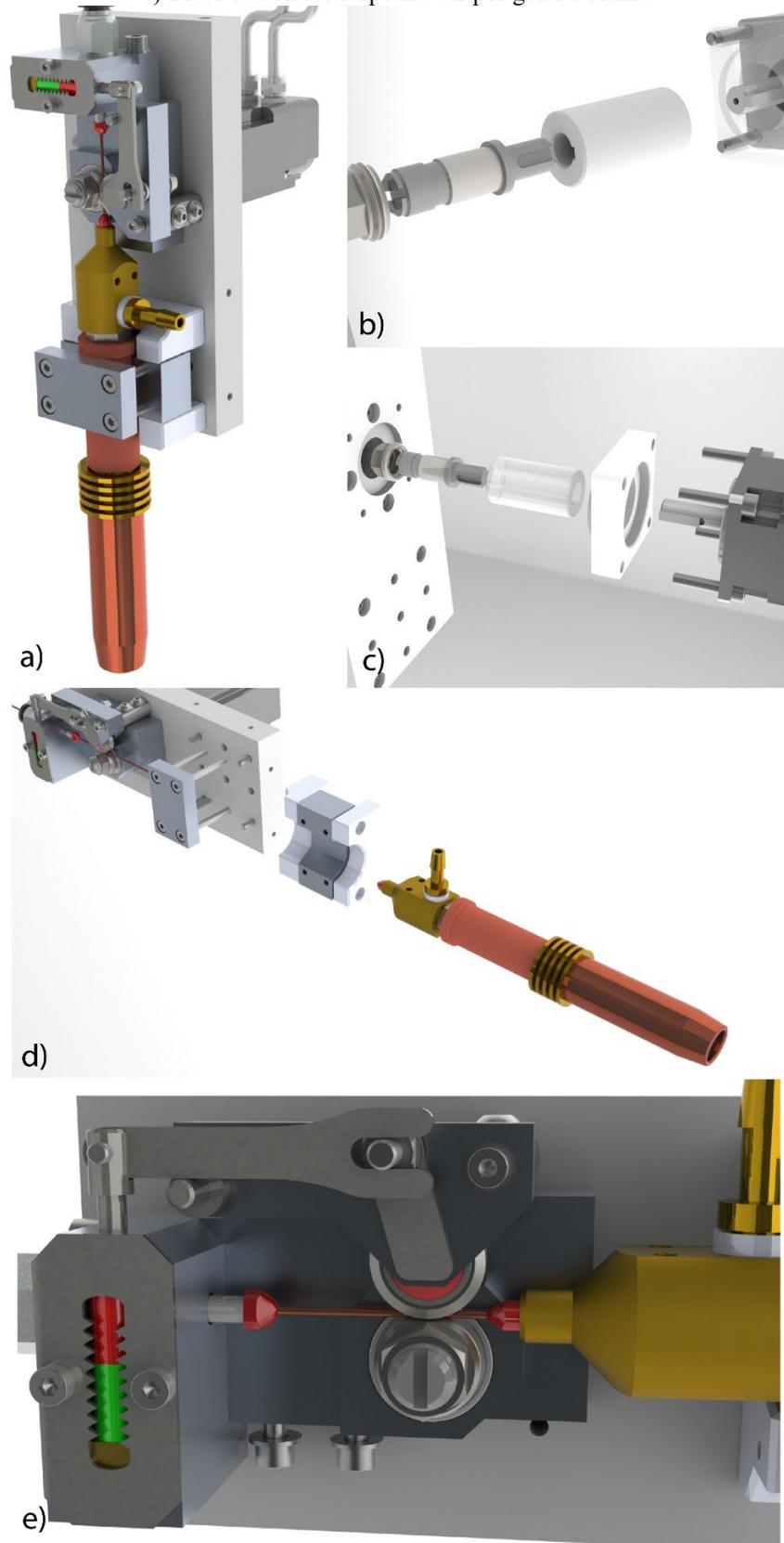
Os resultados apresentados descartaram a defasagem no movimento do arame produzidos pela curvatura do pescoço da tocha. Contudo, ao longo dos ensaios, na medida que se aumentou a frequência de destacamento, o motor apresentou superaquecimento, tornando o pescoço curvo um suspeito de contribuir para um maior esforço por parte do motor, o que resulta em mais corrente em suas bobinas e por consequência mais calor.

Algumas atualizações feitas na tocha foram apresentando problemas ao longo dos ensaios, fazendo-se necessário uma nova versão da tocha, Figura 127. Ao longo dos ensaios em que foram feitas as filmagens de alta velocidade, notou-se atrasos no movimento do arame. Para entender melhor o problema, os sinais de step e dir do microcontrolador, enviados ao servo driver, foram conectados paralelamente ao sistema de aquisição de sinais da câmera de alta velocidade. Após alguns ensaios a investigação descobriu uma deformação no lado quadrado do acoplamento fabricado em PLA, instalado entre o eixo do motor e o eixo do rolete, Figura 124 e). Após a sua substituição, ele apresentou deformação novamente, deixando claro que a área de contato do acoplamento quadrado não era suficiente e o material em PLA não tinha a resistência a mecânica necessária para esta aplicação.

O novo acoplamento, em destaque na Figura 127 b), foi fabricado em nylon. O eixo que suporta o rolete também foi modificado para que utilizasse um rasgo de chaveta, nas mesmas dimensões do eixo do motor, tornando a fabricação do acoplamento e sua instalação mais simples. Para que fosse possível aumentar a área de contato do acoplamento de nylon com o eixo do rolete, foi necessário um flange entre o motor e o corpo da tocha, item c) da Figura 127.

Para eliminar as suspeitas de que a curva do pescoço da tocha estivesse sobrecarregando o motor, foi reutilizado a tocha reta original, sem o circuito de refrigeração à água, tornando necessário a alteração da peça que acomoda o pescoço ao corpo da tocha, ilustrada na Figura 127 d). Foram utilizados bicos direcionadores, de latão, para guiar o arame, antes e após o rolete, como mostra na Figura 127 e), após as os guias em nylon, já ilustradas na Figura 124 d), sofrerem com desgaste.

Figura 127 - Projeto atualizado da tocha; a) Vista completa da tocha reta sem refrigeração; b) Novo eixo e acoplamento com rasgo de chaveta; c) Flange para acomodação do novo acoplamento; d) Fixador da tocha reta; e) Bicos de contato responsáveis por guiar o arame.

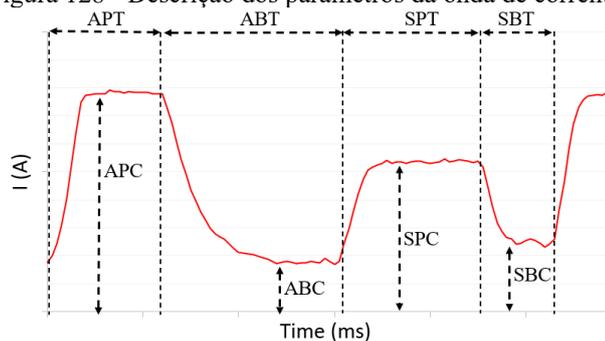


Fonte: Autor.

APÊNDICE 3 – Código fonte da fonte de soldagem MIG-AD

Neste tópico do trabalho buscou-se descrever as fases do processo MIG-AD convencional com maior detalhamento, esclarecendo o fluxo de decisões do código. Para que a apresentação do fluxograma do firmware fique entendível é necessário introduzir os parâmetros relativos ao formato de onda de corrente utilizado. A Figura 128 apresenta uma onda de corrente similar ao CMT convencional, em que estão apresentadas as siglas dos parâmetros em inglês e a descrição em português. Na descrição apresentada junto do gráfico também está evidenciado que dois parâmetros não são configuráveis, são eles o ABT e o SBT. Estes parâmetros são apresentados para auxiliar no entendimento, porém são tempos que dependem de diferentes fenômenos do processo unidos ao movimento do arame.

Figura 128 - Descrição dos parâmetros da onda de corrente.

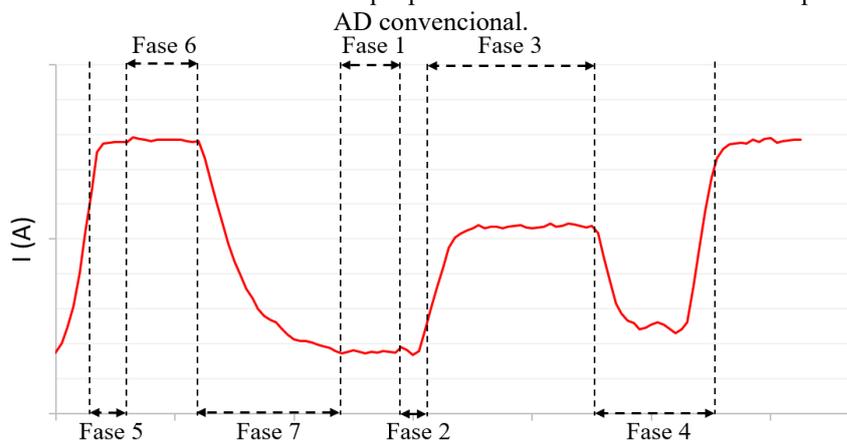


| Parameters | Definição do parâmetro | Observação |
|-----------------------------------|-------------------------------------------------------|------------------|
| Arc Pulse Time (APT) | Duração do pulso de corrente na fase de arco (ms) | |
| Arc Pulse Current (APC) | Amplitude do pulso de corrente na fase de arco (A) | |
| Arc Base Current (ABC) | Valor da corrente de base durante a fase de arco (A) | |
| Arc Base Time (ABT) | Duração da corrente de base no arco (ms) | Não configurável |
| Short-Circuit Pulse Time (SPT) | Duração do pulso de corrente na fase de curto (ms) | |
| Short-Circuit Pulse Current (SPC) | Amplitude do pulso de corrente na fase de curto (A) | |
| Short-Circuit Base Time (SBT) | Duração da corrente de base na fase de curto (ms) | Não configurável |
| Short-Circuit Base Current (SBC) | Valor da corrente de base durante a fase de curto (A) | |

Fonte: Autor.

Pode-se dividir o código responsável pela operação da fonte durante o processo de soldagem em 7 fases. Estas fases estão representadas na Figura 129 de maneira que é possível entender de que parte do ciclo da onda de corrente a fase é responsável por comandar.

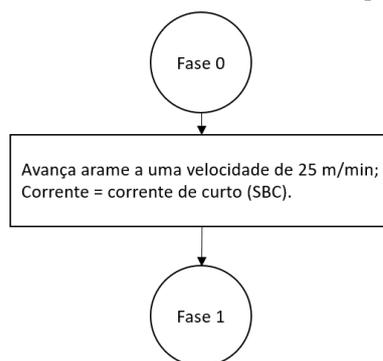
Figura 129 – Onda de corrente e tensão com destaque para as diferentes fases do firmware para o processo MIG-AD convencional.



Fonte: Autor.

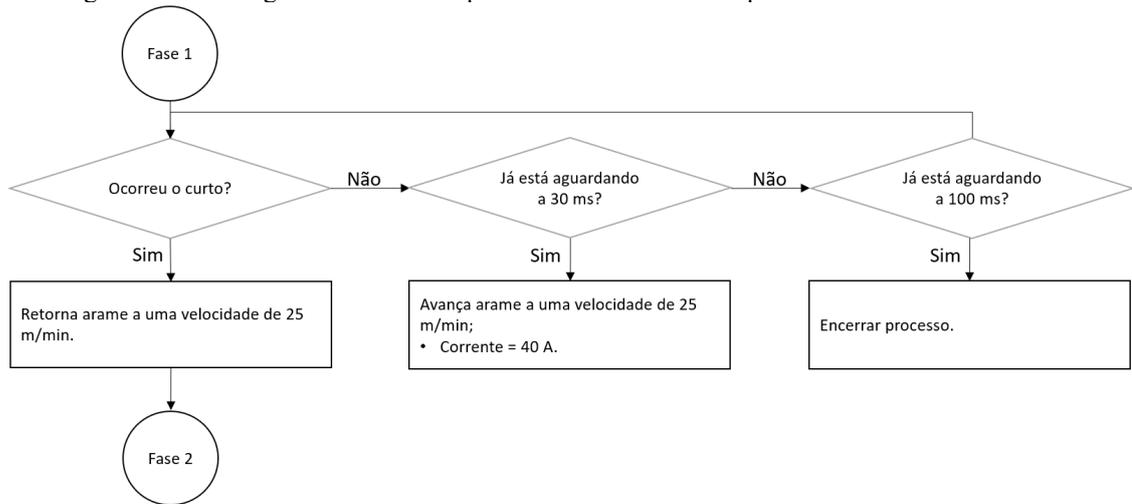
Complementar ao texto anterior, em que são apresentadas as fases do software responsável pelo controle no processo MIG-AD convencional, a Figura 130, Figura 131, a Figura 132, a Figura 133, a Figura 134, a Figura 135, Figura 136 e a Figura 137 apresentam com detalhes as lógicas de programação implementadas na fonte para as Fases 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7, respectivamente. Buscando um entendimento mais simplificado do fluxo do software a Figura 138 ilustra as sequências possíveis do código. Foi disponibilizado o vídeo do processo, Figura 139, filmado pela câmera de alta velocidade para que auxilie no entendimento do fluxo das fases.

Figura 130 - Fluxograma de decisões da Fase 0 do software para o MIG-AD Convencional



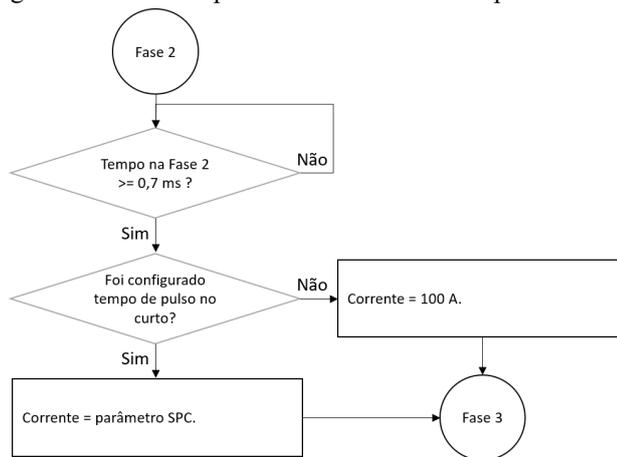
Fonte: Autor.

Figura 131 - Fluxograma de decisões para a Fase 1 do software para o MIG-AD Convencional.



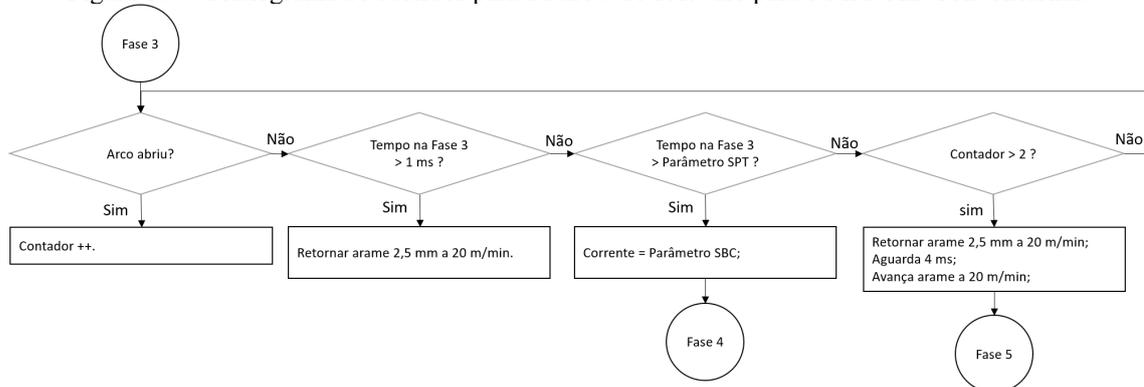
Fonte: Autor.

Figura 132 - Fluxograma de decisões para a Fase 2 do software para o MIG-AD Convencional.



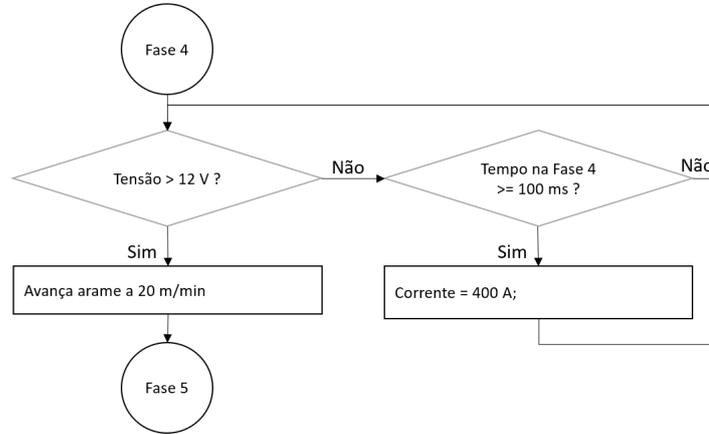
Fonte: Autor.

Figura 133 - Fluxograma de decisões para a Fase 3 do software para o MIG-AD Convencional.



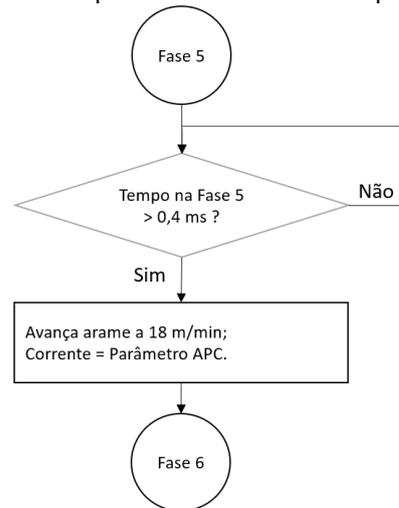
Fonte: Autor.

Figura 134 - Fluxograma de decisões para a Fase 4 do software para o MIG-AD Convencional.



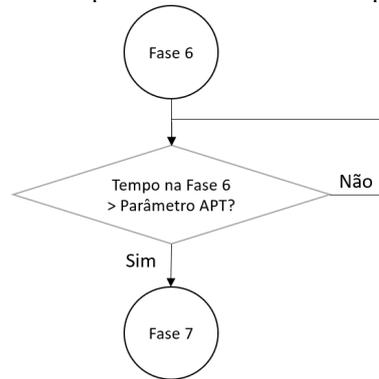
Fonte: Autor.

Figura 135 - Fluxograma de decisões para a Fase 5 do software para o MIG-AD Convencional.



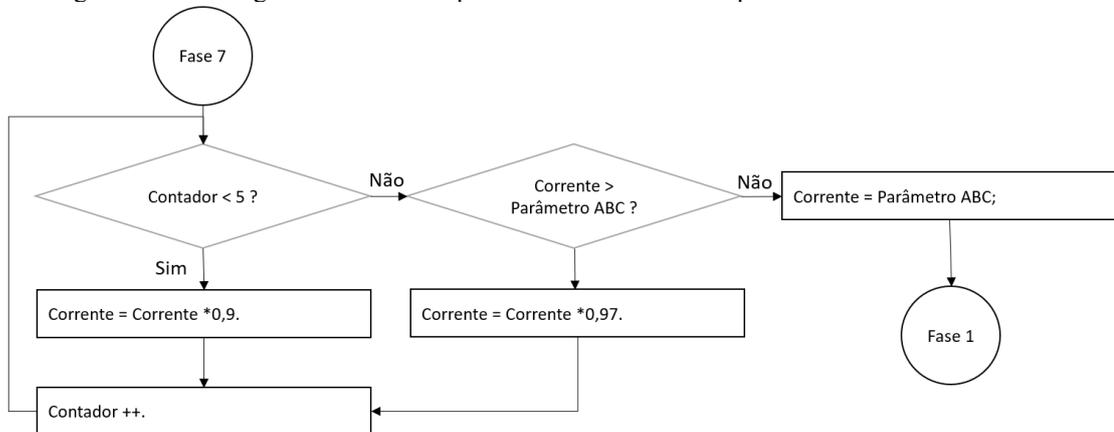
Fonte: Autor.

Figura 136 - Fluxograma de decisões para a Fase 6 do software para o MIG-AD Convencional.



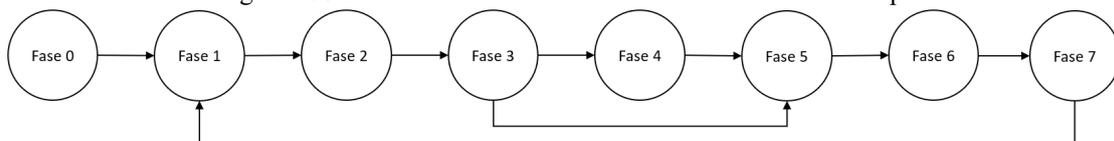
Fonte: Autor.

Figura 137 - Fluxograma de decisões para a Fase 7 do software para o MIG-AD Convencional.



Fonte: Autor.

Figura 138 - Fluxo de fases do software da fonte MIG-AD simplificado.



Fonte: Autor.

Figura 139 - Link para filmagem de alta velocidade do processo para auxiliar no entendimento do fluxo das fases do firmware.

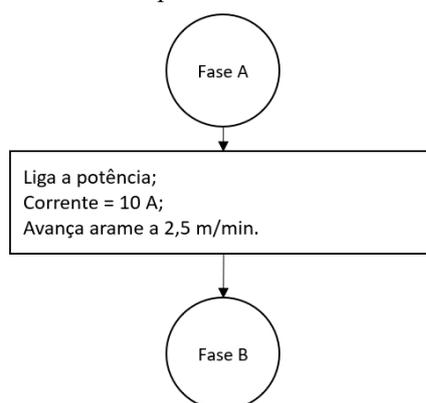


Fonte: Autor.

Para gerar o decaimento da corrente foi feita uma lógica no firmware da fonte de soldagem onde a variável que armazena o valor da corrente tem o seu valor multiplicado por 0,9 por cinco vezes, e posteriormente multiplicado por 0,97 até que o valor da corrente atinja o patamar da corrente programado no parâmetro ABC, como ilustrado no fluxograma da Figura 137. O ciclo do microcontrolador é de 0,1 ms, deste modo, o valor da corrente decai 41% em 0,5 ms e posteriormente decai 3% a cada 0,1 ms. A utilização desta técnica deve-se ao movimento do arame estar em aproximação da poça enquanto este processo ocorre, e para evitar que a pressão do arco afete negativamente a agitação da poça, a corrente inicialmente é reduzida mais rapidamente e quando já está mais próximo a corrente de base no arco a pressão exercida na poça já não é significativa para causar perturbações.

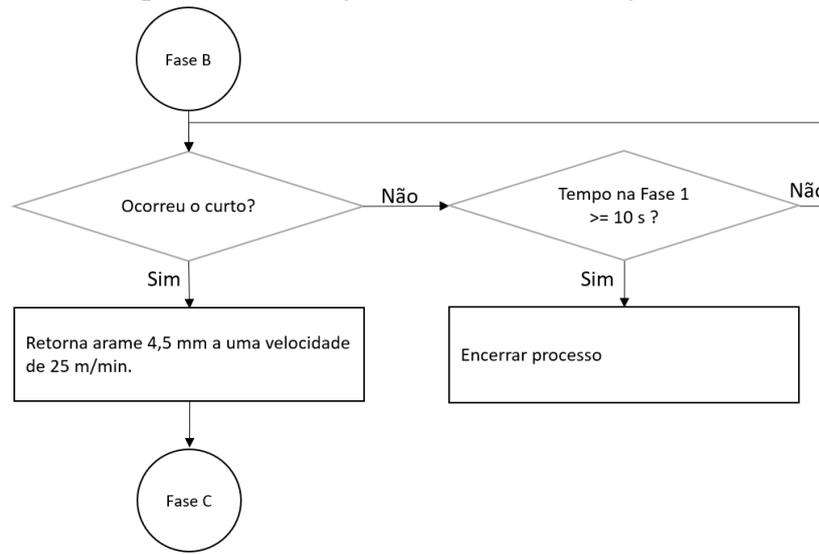
Os ensaios de revestimento, apresentados posteriormente neste trabalho, evidenciaram a importância da lógica de controle responsável pela abertura do arco ao iniciar cada cordão. Foram realizados ajustes no firmware, durante os ensaios de revestimento, que garantiram robustez na abertura. Dada a importância e a demanda exigida para o seu desenvolvimento, o código foi transcrito para um fluxograma com 5 etapas, ilustradas na Figura 140, Figura 141, Figura 142, Figura 143 e Figura 144, representando as fases A, B, C, D e E, respectivamente. Ao concluir a etapa de abertura, o código da sequência a Fase 0 da onda de corrente, já apresentada na Figura 130. O fluxo possível das fases da abertura também foi criado e está ilustrado na Figura 145. A filmagem do processo de abertura está disponível na Figura 146.

Figura 140 - Fluxograma de decisões para a Fase A do software para a abertura do arco.



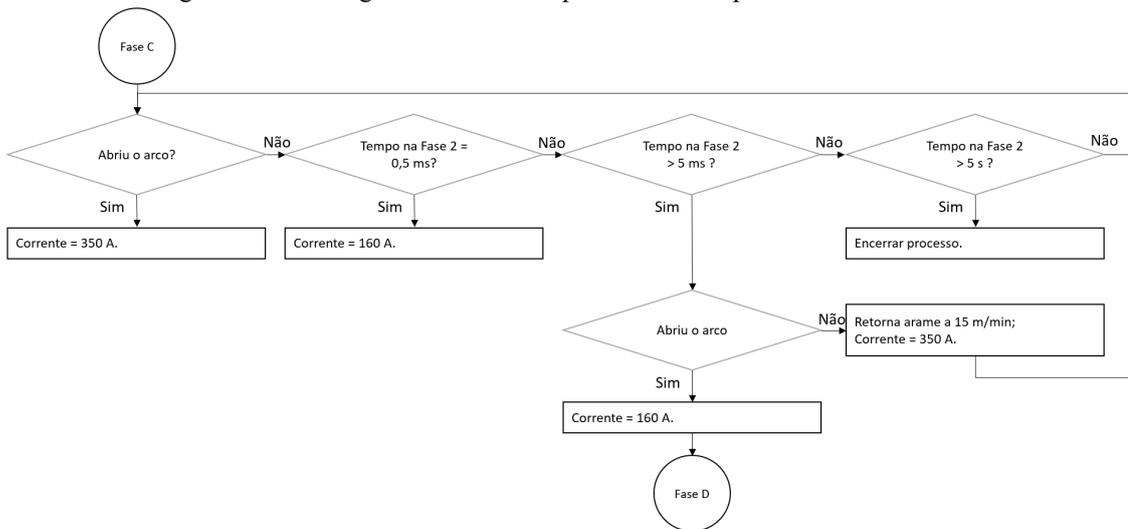
Fonte: Autor.

Figura 141 - Fluxograma de decisões para a Fase B do software para a abertura do arco



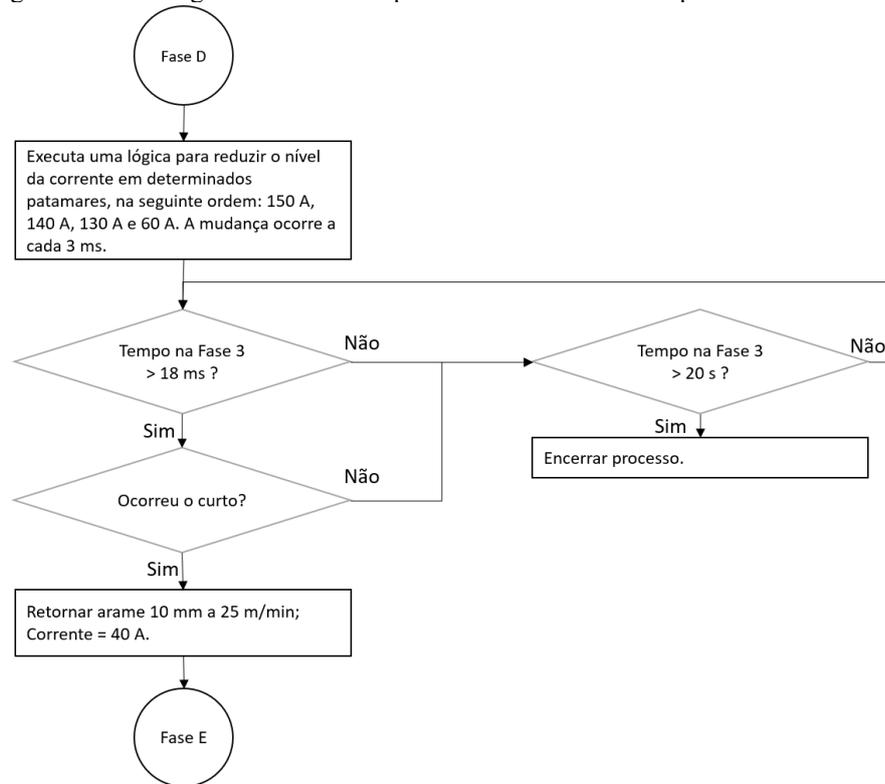
Fonte: Autor.

Figura 142 - Fluxograma de decisões para a Fase C e para a abertura do arco



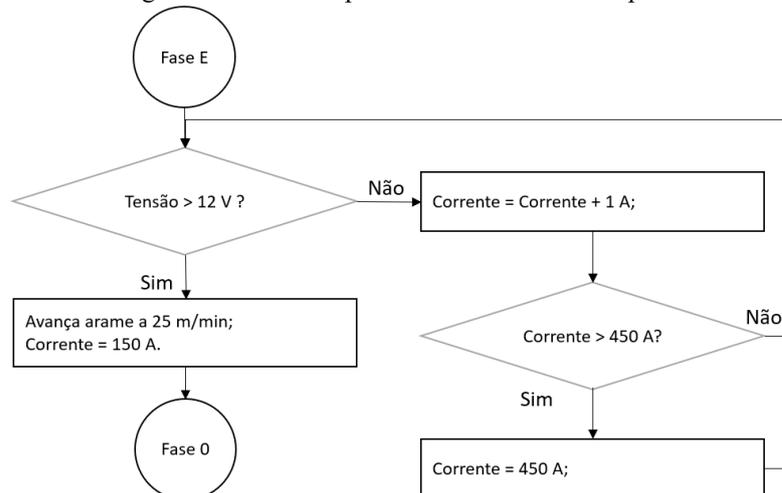
Fonte: Autor.

Figura 143 - Fluxograma de decisões para a Fase D do software para a abertura do arco



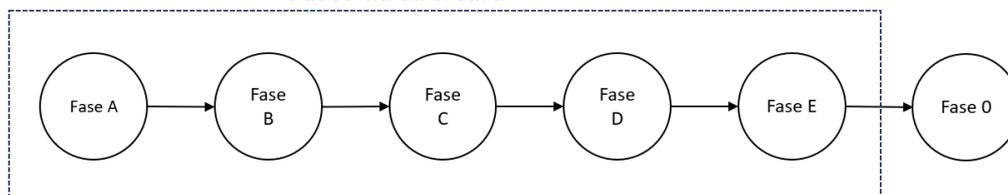
Fonte: Autor.

Figura 144 - Fluxograma de decisões para a Fase E do software para a abertura do arco



Fonte: Autor.

Figura 145 - Fluxo de fases do processo de abertura do arco na fonte MIG-AD
Fases da abertura



Fonte: Autor.

Figura 146 - Link para filmagem de alta velocidade da abertura do arco



Fonte: Autor.

Logo após a abertura do arco a peça continua fria, precisando de mais tempo até que ganhe energia suficiente para aquecer. A baixa temperatura da chapa e o pouco material disponível na poça no início do cordão pode causar o problema de grudar o arame na peça. A fase 3 do processo descrito na Figura 133 permite o processo solucionar este problema. Uma das filmagens de alta velocidade permitiu visualizar este fenômeno, disponível no link da Figura 147.

Figura 147 - Link para filmagem de alta velocidade da rotina para desgrudar arame.



Fonte: Autor.

APÊNDICE 4 – Análise do movimento do motor, teste de velocidade em movimentos oscilatórios de 100 Hz

Este ensaio visa investigar a velocidade do motor em movimentos oscilatórios, de avanço e recuo, em alta frequência. O período para completar o movimento, de avanço e recuo, foi de 10 ms. Este período foi estabelecido com base na frequência de deposição de gotas em equipamentos similares, os quais podem atingir 100 Hz.

O ensaio anterior confirmou que a velocidade máxima do motor é de 440 m/min. Contudo, neste ensaio, será empregado valores de até 1100 m/min na função “MudarMov”, conforme registrado na Tabela 21. Essa decisão é fundamentada na suposição de que o motor não terá tempo suficiente para atingir a velocidade de regime no intervalo de 5 ms. A ocorrência de uma alteração do sentido e da velocidade, interromperia a aceleração do motor em um momento transitório da curva de velocidade, em um momento em que a velocidade ainda não tenha atingido o setpoint definido na função “MudarMov”. Permitindo, assim, avaliar a velocidade máxima a qual o motor pode alcançar em um movimento oscilatório, com período de 10 ms.

Tabela 21 – Parâmetros para o terceiro ensaio: Velocidade em movimento oscilatório de 100 Hz

| Comando | Avançar | Recuar |
|---------|--------------------------------|---------------------------------|
| | 0,000 s | 0,005 s |
| 3.a | MudarMov(50.0, DIRAVANCA, 0) | MudarMov(50.0, DIRRETORNA, 0) |
| 3.b | MudarMov(100.0, DIRAVANCA, 0) | MudarMov(100.0, DIRRETORNA, 0) |
| 3.c | MudarMov(200.0, DIRAVANCA, 0) | MudarMov(200.0, DIRRETORNA, 0) |
| 3.d | MudarMov(300.0, DIRAVANCA, 0) | MudarMov(300.0, DIRRETORNA, 0) |
| 3.e | MudarMov(400.0, DIRAVANCA, 0) | MudarMov(400.0, DIRRETORNA, 0) |
| 3.f | MudarMov(500.0, DIRAVANCA, 0) | MudarMov(500.0, DIRRETORNA, 0) |
| 3.g | MudarMov(600.0, DIRAVANCA, 0) | MudarMov(600.0, DIRRETORNA, 0) |
| 3.h | MudarMov(700.0, DIRAVANCA, 0) | MudarMov(700.0, DIRRETORNA, 0) |
| 3.i | MudarMov(800.0, DIRAVANCA, 0) | MudarMov(800.0, DIRRETORNA, 0) |
| 3.j | MudarMov(900.0, DIRAVANCA, 0) | MudarMov(900.0, DIRRETORNA, 0) |
| 3.k | MudarMov(1000.0, DIRAVANCA, 0) | MudarMov(1000.0, DIRRETORNA, 0) |
| 3.l | MudarMov(1100.0, DIRAVANCA, 0) | MudarMov(1100.0, DIRRETORNA, 0) |

Fonte: Autor.

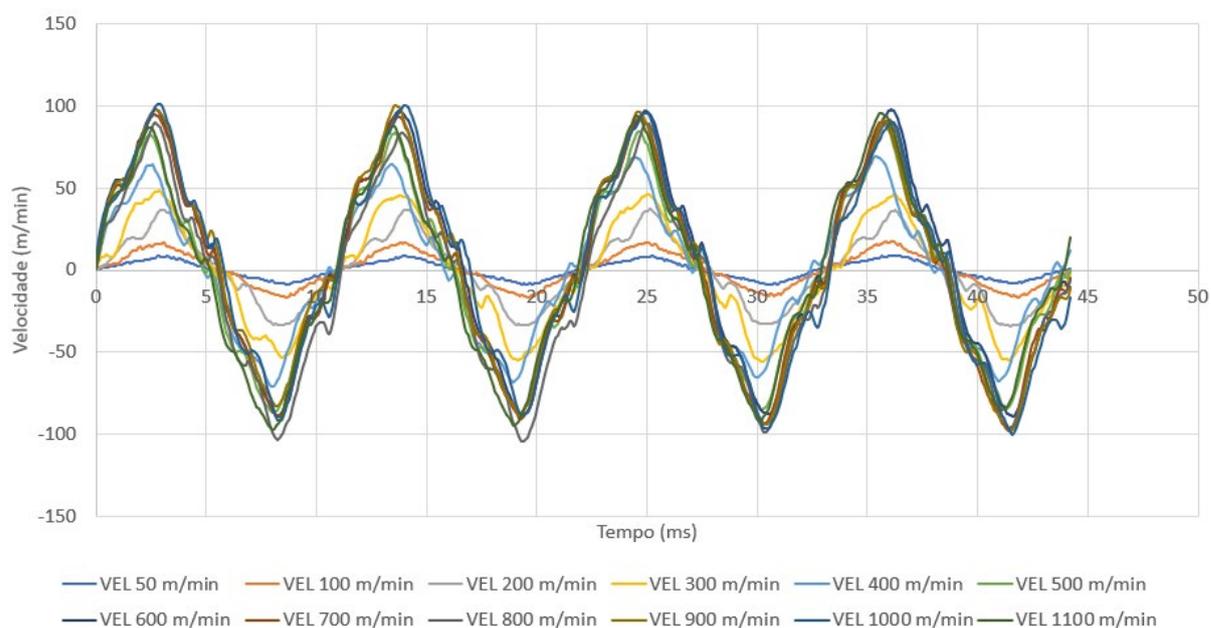
Como mencionado anteriormente, a função "MudarMov" requer a definição da distância desejada para o percurso, ou quando configurada com o valor zero, o motor rotaciona indefinidamente até receber o próximo comando. Neste ensaio, optou-se por utilizar o valor zero. Essa decisão é fundada na lógica do controle PID, do servo driver, o qual pode limitar a inclinação da curva de velocidade, a aceleração, para não ultrapassar a distância definida, buscando evitar um sobressinal. O valor de controle PID simplificado do servo driver, nomeado pelo sistema da Kollmorgen como "tuning por cursor" ficou configurado em 225, em uma escala que varia de 0 a 300. Esta escala é responsável por definir os parâmetros de controle PID do servo driver, de forma análoga a um sinérgico em sistemas de soldagem, modificando assim o comportamento do movimento do motor tanto em velocidade, aceleração como também posição.

Dentro de um único período da curva de soldagem do MIG-AD convencional, pode-se identificar dois momentos em que podem ser utilizados o valor zero para a distância. O primeiro ocorre quando o arco está aberto e o arame avança contra a poça. Neste instante, a distância entre o arame e a poça de fusão pode variar de acordo com a dinâmica da poça, ou até mesmo ser alterada por irregularidades na trajetória, causando alteração de DBCP ao longo da trajetória de soldagem. O segundo momento em que se utiliza o valor zero, como valor de distância na função "MudarMov", é durante curto-circuito. Quando o arame está recuando e a fonte de soldagem está monitorando o rompimento da ponte metálica, a qual pode ser mais alongada à medida que a tensão superficial aumenta.

A Figura 148 ilustra a resposta do motor para os diferentes parâmetros de velocidade, configuradas na função "MudarMov", dentro de um período de 5 ms, avançando arame e 5 ms recuando. Nos primeiros 5 ms é possível visualizar a resposta da velocidade do motor enquanto ele avança, acelerando, entre 0 e 2,5 ms até atingir a velocidade máxima, e a partir de desse instante, desacelera até parar no momento 5 ms. Inicia o movimento de recuo, até sua velocidade máxima no recuo em 7,5 ms, e desacelera com o mesmo perfil de aceleração até parar no instante 10 ms.

É imprescindível ressaltar que, ao analisar os resultados apresentados na Figura 148, observou-se que os quatro períodos ultrapassaram os 40 ms. Consequentemente, resultando em 0,9 ms a mais do que o planejado para o período, inicialmente idealizado como 10 ms. Essa discrepância pode ser atribuída a um atraso na contagem do temporizador, ocasionado por interrupções no firmware. Para fins de cálculo de aceleração, essa diferença será considerada.

Figura 148 – Resultado do terceiro ensaio: Perfil de velocidade para diferentes *setpoints*.

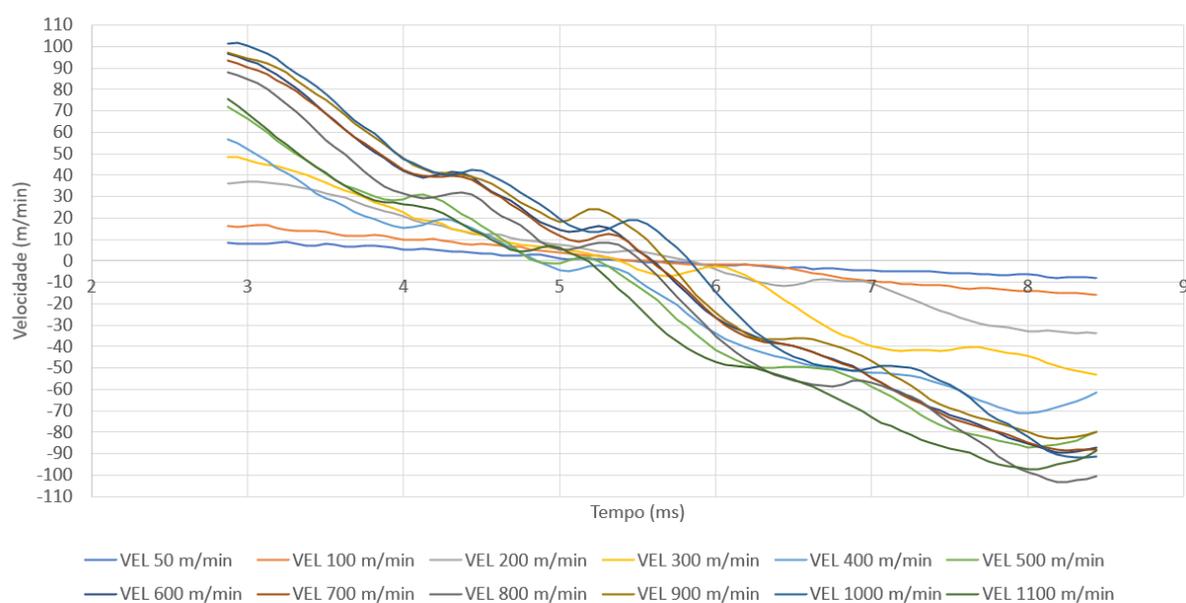


Fonte: Autor.

Buscando auxiliar a visualização da inclinação da curva de velocidade, é apresentado um trecho de apenas 5 ms na Figura 149. Fica evidente entre os valores de 50 a 400 m/min a mudança da inclinação da curva de velocidade. Fato relevante, o qual permite afirmar que o parâmetro de velocidade, aplicado na função “MudarMov”, alterou a aceleração.

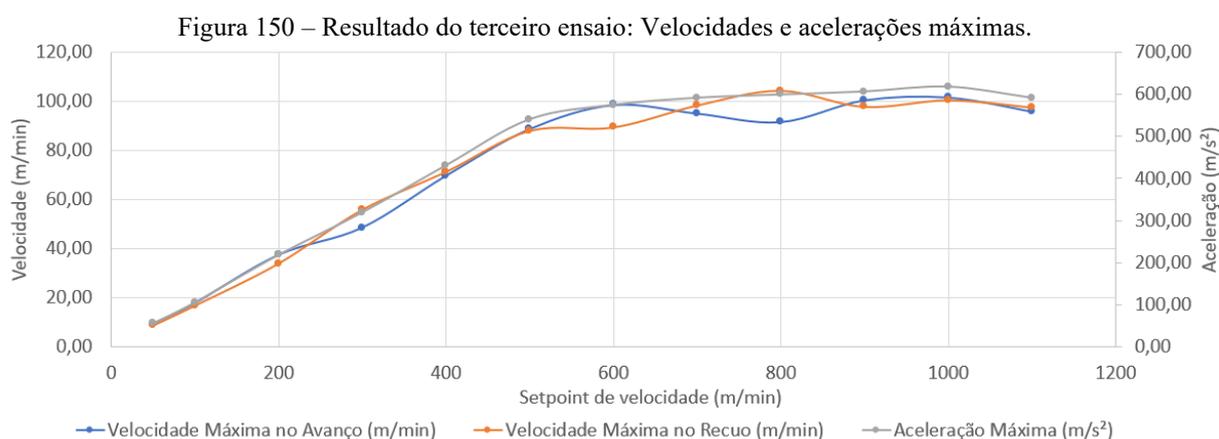
Figura 149 - Resultado do terceiro ensaio: Ampliação da curva de velocidade para diferentes *setpoints*.

Perfil de Velocidade Para Diferentes SetPoints



Fonte: Autor.

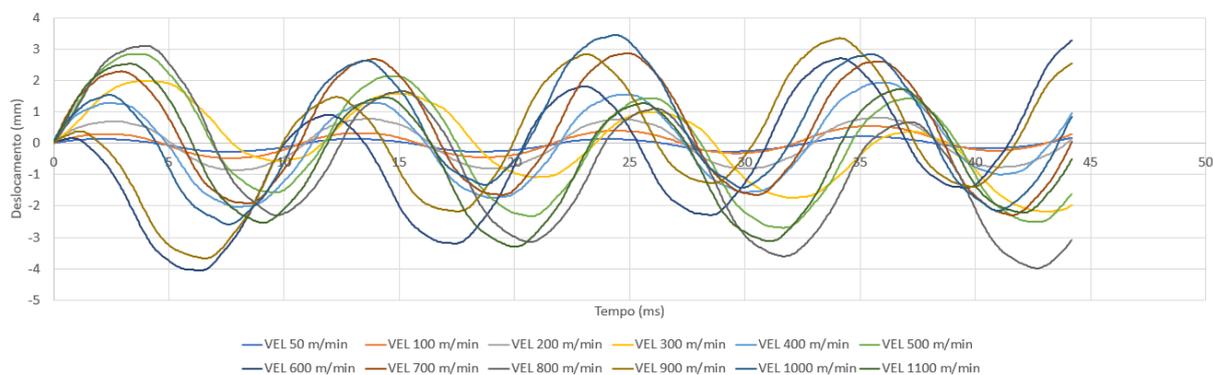
Ao isolarmos as máximas velocidades e acelerações chegamos a Figura 150, na qual se apresentam as máximas velocidades em m/min e as máximas acelerações em m/s². O eixo horizontal apresenta o valor utilizado como parâmetro de velocidade na função “MudarMov”. Conclui-se que a velocidade máxima do motor não aumenta significativamente após o parâmetro 500 m/min, atingindo um platô entre os parâmetros 600 e 1100 m/min. O resultado deste ensaio também permite afirmar que a velocidade configurada na função “MudarMov” não foi atingida no período proposto, considerando as condições de operação já descritas. Outra conclusão importante é que ao utilizar o parâmetro 600 m/min, é possível atingir a velocidade de 100 m/min em um movimento oscilatório de avança e recua com um período de duração de 10,9 ms.



Fonte: Autor

A Figura 151 apresenta o comportamento da trajetória do movimento, a qual apresentou uma assimetria, apesar dos tempos configurados para o avanço e para o recuo serem iguais. Esta tendência de o arame recuar um pouco mais do que avança a cada ciclo, se intensificou com o aumento da velocidade configurada. É importante ressaltar que a configuração do driver está em modo posição combinado com velocidade. Esta configuração permite que o motor interrompa a trajetória atual para responder a um novo comando de velocidade ou sentido de rotação, sem ter concluído o movimento anterior.

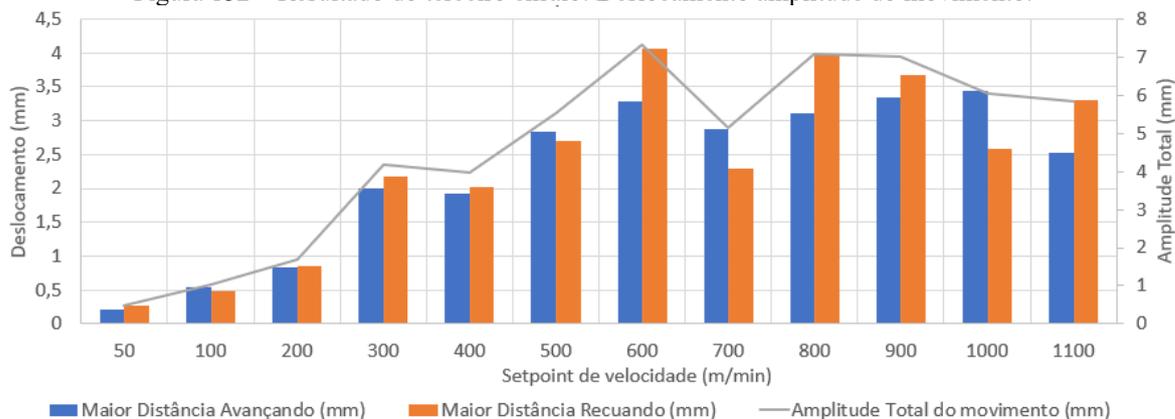
Figura 151 – Resultado do terceiro ensaio: Comportamento do deslocamento do motor



Fonte: Autor

A Figura 152 ilustra os máximos deslocamentos atingidos para os diferentes valores de velocidade, reafirmando que não se atingiu maiores deslocamentos ao configurar a fonte com valores de velocidade superiores a 600 m/min.

Figura 152 – Resultado do terceiro ensaio: Deslocamento amplitude do movimento.



Fonte: Autor.

Outra conclusão importante deste ensaio foi a limitação de velocidade, em ciclos de alta frequência. Pois durante o ensaio constatou-se que a velocidade de 1100 m/min gera a falha 304 no driver, após alguns segundos com o motor em operação. Tal falha refere-se ao excesso de corrente no motor, causado por um movimento que exigiu muita potência. Os gráficos apresentam a velocidade de 1100 m/min apenas com o intuito de mostrar que se atingiu o limite de operação do motor para o perfil de movimento exigido no processo de soldagem com a fonte MIG-AD. Para os próximos ensaios será utilizado velocidades de até 1000 m/min, devido a esta limitação.

A estratégia utilizada neste ensaio revelou uma característica indesejável para o processo que se pretende utilizar este conjunto de servo driver e servomotor. Observou-se um

atraso significativo entre o comando de reversão e a resposta do motor a este comando. Ao submeter o motor a máxima aceleração em um sentido e, no instante seguinte, reverter o sentido do motor, evidenciou-se um atraso entre o comando e a resposta, em média de $3,4 \pm 0,2$ ms. Isso fica aparente na Figura 153, em que apresento uma linha vertical azul para o instante em que foi comandado a reversão e uma linha vertical amarela para destacar o momento em que a reversão do movimento ocorreu.

Figura 153 – Resultado do terceiro ensaio: Atraso entre o comando do driver e a resposta do motor.



Fonte: Autor.

Podemos concluir com este ensaio que é possível atingir a velocidade de 100 m/min, com um deslocamento de 3 a 4 mm em movimentos oscilatórios, de avança e recua, dentro do tempo proposto. Entretanto, o tempo de resposta do motor, utilizando esta estratégia, é insatisfatório para um processo tão dinâmico como o MIG-AD.

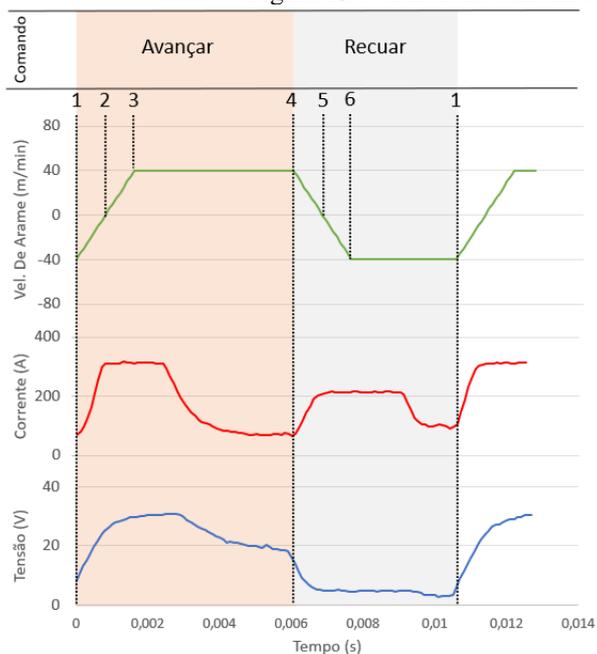
APÊNDICE 5 – Análise do movimento do motor, avaliação da estratégia de alteração de velocidade antes da inversão

Como constatado no ensaio descrito no Apêndice 4, para se obter acelerações altas, se faz necessário utilizar parâmetros de velocidade superiores a 500 m/min, na função “MudarMov”. A aceleração elevada é necessária, devido ao curto período de tempo que se deseja mover o arame para baixo, buscando o curto-circuito, ou quando recuando, para romper a ponte metálica. Contudo, a estratégia de manter a aceleração elevada até o momento da reversão do movimento apresentou um atraso, indesejado, na resposta do motor.

Este ensaio pretende reduzir o tempo entre o comando da fonte e a resposta do motor. A estratégia será alterar o parâmetro de velocidade do motor na função “MudarMov” antes do momento da reversão. Desta maneira o período de avanço, que antes utilizava apenas um valor de velocidade durante os 5 ms, agora será dividido em duas partes. A primeira parte será definida com um valor de velocidade elevada. Na segunda parte a velocidade será reduzida, buscando reduzir a aceleração do motor antes do momento da reversão.

A Figura 154 apresenta a suposta estratégia de velocidade utilizada por modelos de fonte de soldagem GMAW com alimentação dinâmica. É possível visualizar que a aceleração no período que compreende o ponto 3 e 4, da Figura 154, é zero. A estratégia apresentada neste ensaio, denominado Ensaio 4, tem uma certa similaridade com o apresentado na Figura 154.

Figura 154 - Curva de velocidade de arame idealizada.



Observações do movimento do motor

1. Iniciou a inversão do movimento do arame, com a desaceleração do movimento de recuo;
2. Motor passa por um instante parado enquanto inverte o movimento;
3. Motor atinge velocidade de regime avançando arame em direção a poça;
4. Novamente inicia-se a inversão do movimento, agora desacelerando o movimento de avanço;
5. Motor se encontra parado;
6. Arame atinge velocidade de regime, recuando arame.

Fonte: Autor.

Uma consequência esperada para esta estratégia será uma redução do deslocamento total do arame. Por este motivo será apresentado uma série de testes com diferentes tempos e patamares de velocidade.

A Tabela 22 apresenta, nas duas primeiras colunas, os dois patamares a serem utilizados, iniciando com uma velocidade alta e após um tempo denominado como ΔT , a velocidade é reduzida, mas o sentido é mantido. Após 5 ms o comando será alterado para recuar o arame a uma velocidade elevada e após o mesmo intervalo de tempo ΔT , a velocidade será alterada e o sentido mantido. Após o período proposto de 10 ms, o processo se repete. O ensaio 4 será subdividido em quatro partes: 4.1. corresponde a ΔT de 1 ms, 4.2. a ΔT de 2 ms, 4.3. a ΔT de 3 ms e 4.4. a ΔT de 4 ms. Quando o texto se referir a o ensaio 4.2.d, está se referindo ao parâmetro de 500 m/min por 2 ms e o parâmetro de 300 m/min por 3 ms, na direção de avançar o arame, e na sequência a inversão do movimento com os mesmos tempos e patamares.

Tabela 22 - Parâmetros para o quarto ensaio.

| Comando | Avançar | | Recuar | | 0,010 s |
|---------|--------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|---------|
| | 0,000 s | ΔT | 0,005 s | ΔT | |
| a) | MudarMov(500.0, DIRAVANCA, 0) | MudarMov(50.0, DIRAVANCA, 0) | MudarMov(500.0, DIRRETORNA, 0) | MudarMov(50.0, DIRRETORNA, 0) | |
| b) | MudarMov(500.0, DIRAVANCA, 0) | MudarMov(100.0, DIRAVANCA, 0) | MudarMov(500.0, DIRRETORNA, 0) | MudarMov(100.0, DIRRETORNA, 0) | |
| c) | MudarMov(500.0, DIRAVANCA, 0) | MudarMov(200.0, DIRAVANCA, 0) | MudarMov(500.0, DIRRETORNA, 0) | MudarMov(200.0, DIRRETORNA, 0) | |
| d) | MudarMov(500.0, DIRAVANCA, 0) | MudarMov(300.0, DIRAVANCA, 0) | MudarMov(500.0, DIRRETORNA, 0) | MudarMov(300.0, DIRRETORNA, 0) | |
| e) | MudarMov(1000.0, DIRAVANCA, 0) | MudarMov(50.0, DIRAVANCA, 0) | MudarMov(1000.0, DIRRETORNA, 0) | MudarMov(50.0, DIRRETORNA, 0) | |
| f) | MudarMov(1000.0, DIRAVANCA, 0) | MudarMov(100.0, DIRAVANCA, 0) | MudarMov(1000.0, DIRRETORNA, 0) | MudarMov(100.0, DIRRETORNA, 0) | |
| g) | MudarMov(1000.0, DIRAVANCA, 0) | MudarMov(200.0, DIRAVANCA, 0) | MudarMov(1000.0, DIRRETORNA, 0) | MudarMov(200.0, DIRRETORNA, 0) | |

Fonte: Autor.

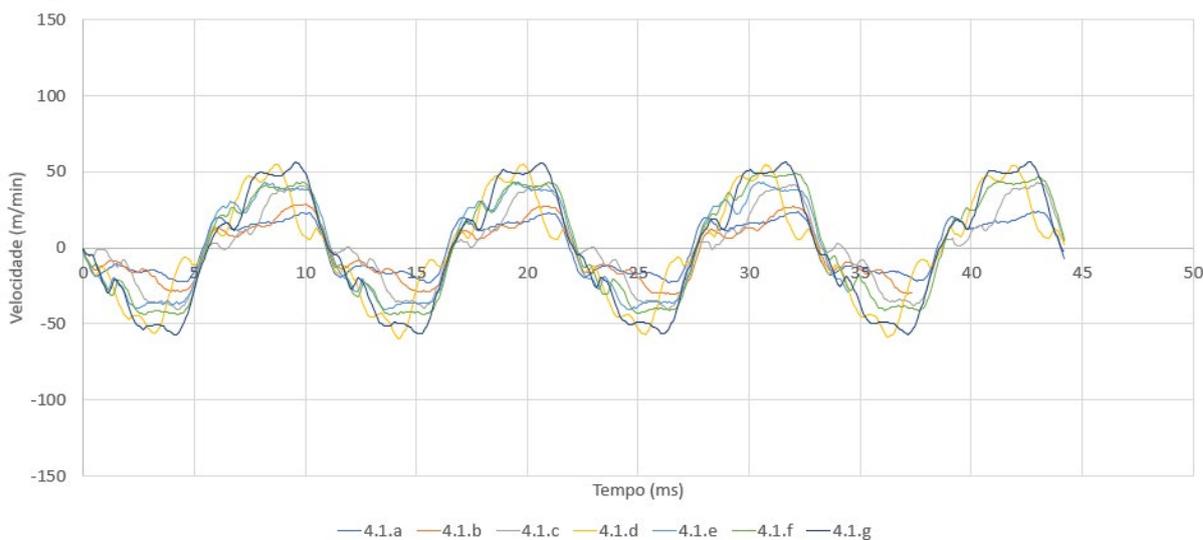
Ensaio 4.1, ΔT de 1 ms:

Será apresentado o resultado de todos os conjuntos de parâmetros apresentados na Tabela 22 para um ΔT de 1 ms. A Figura 155 apresenta o perfil da curva de velocidade executada pelo motor. É possível notar um platô formado por uma alteração da aceleração. Mesmo que no momento da alteração do parâmetro de velocidade a nova velocidade se mantenha acima da velocidade em que se encontra, a aceleração é reduzida. Esse comportamento é ocasionado pelo sistema de controle PID do driver, o qual busca evitar um sobressinal. Os perfis de velocidade apresentados neste primeiro ensaio se assemelham com o perfil idealizado, já apresentado na Figura 154. A consequência deste perfil de movimento é evidenciado na Figura 156, com a drástica redução do deslocamento.

O resultado é positivo, quando comparamos o tempo de resposta, Figura 157, com o terceiro ensaio, o qual apresentou um tempo de resposta de 3,4 ms. O tempo de resposta entre o comando do servo driver e a resposta do servomotor para o ensaio 4.1.a foi de 1,39 ms, enquanto a amplitude total do movimento foi de apenas 1,8 mm.

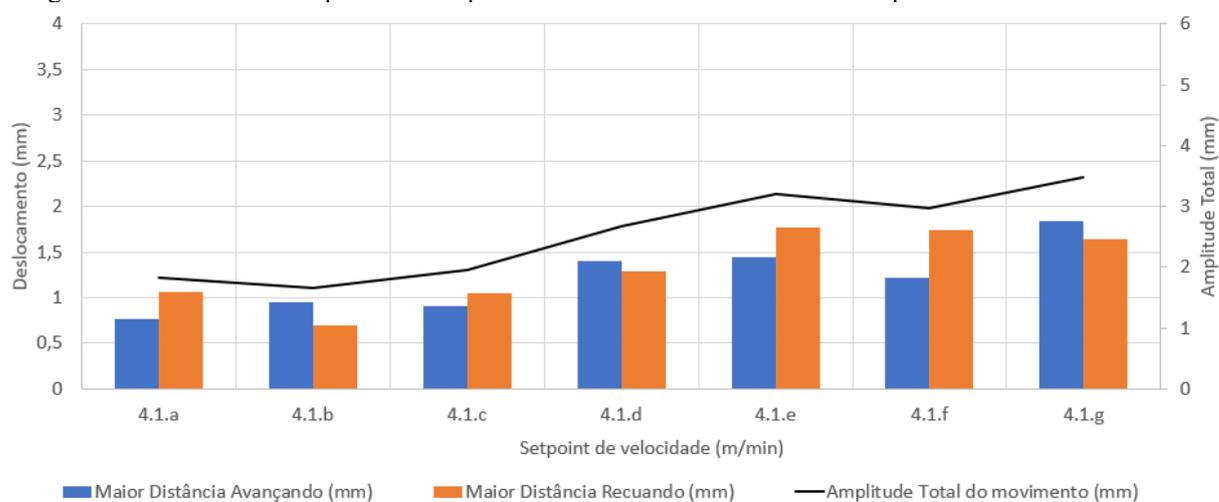
Apesar da melhora significativa para o tempo de resposta, a amplitude total do movimento impossibilita a utilização do conjunto de parâmetros do ensaio 4.1.a, 4.1.b, 4.1.c e 4.1.d na aplicação do processo de soldagem MIG-AD. Ao analisar os ensaios 4.1.e, 4.1.f e 4.1.g, todos atingiram uma amplitude superior a 3 mm, dentre estes ensaios o ensaio 4.1.e obteve um melhor tempo de resposta, $1,45 \pm 0,06$ ms. Apesar de que, quando comparamos o resultado do ensaio 4.1.e com o terceiro ensaio, utilizando o parâmetro de velocidade em 600 m/min, o deslocamento reduziu de 7 mm para 3 mm.

Figura 155 – Resultado do quarto ensaio para um ΔT de 1 ms: Perfil de velocidade para diferentes *setpoints*.



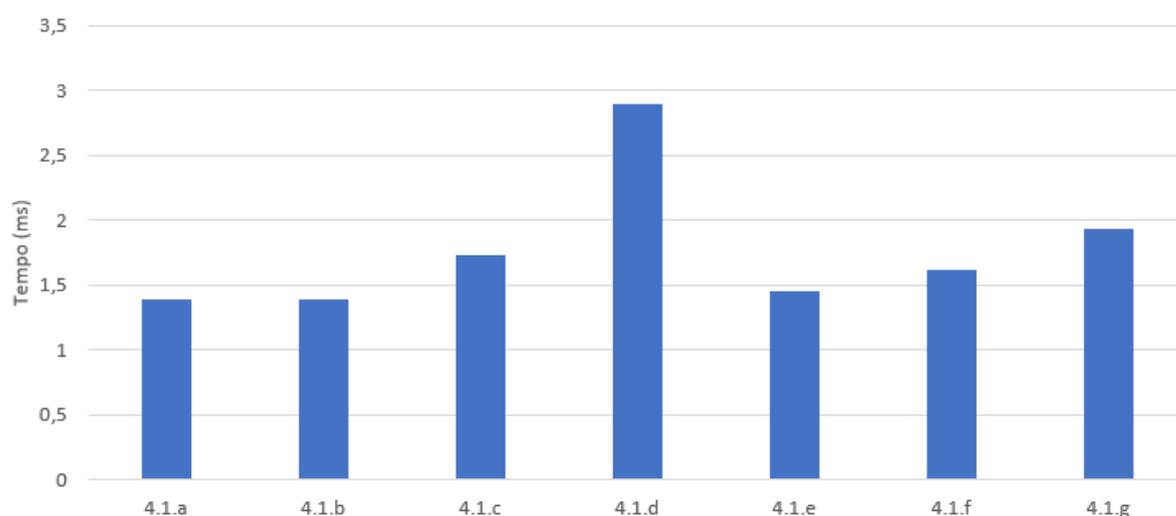
Fonte: Autor

Figura 156 – Resultado do quarto ensaio para um ΔT de 1 ms: Deslocamento amplitude do movimento.



Fonte: Autor.

Figura 157 – Resultado do quarto ensaio para um ΔT de 1 ms: Tempo entre comando do driver e resposta do motor.



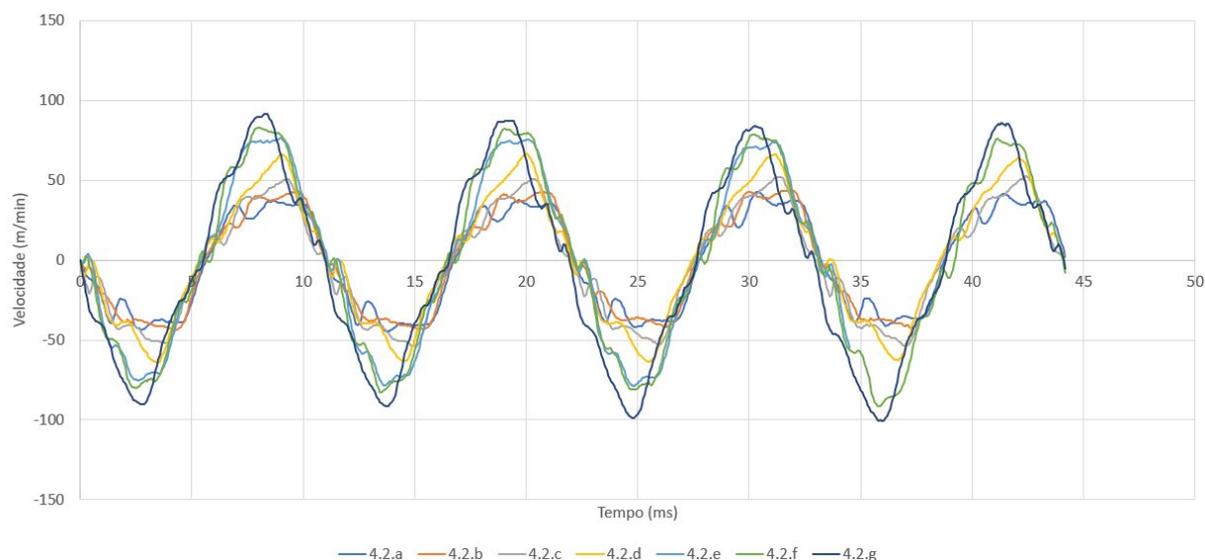
Fonte: Autor.

Ensaio 4.2, ΔT de 2 ms:

Em particular, neste ensaio, foi possível registrar um aumento substancial nas velocidades máximas, quando comparamos com o ensaio 4.1, conforme ilustrado na Figura 158. Maiores velocidades implicaram em uma considerável elevação do deslocamento do arame, conforme retratado na Figura 159. Não obstante, o aprimoramento do desempenho até agora apresentado também trouxe consigo o desafio de obter um reduzido tempo de reposta.

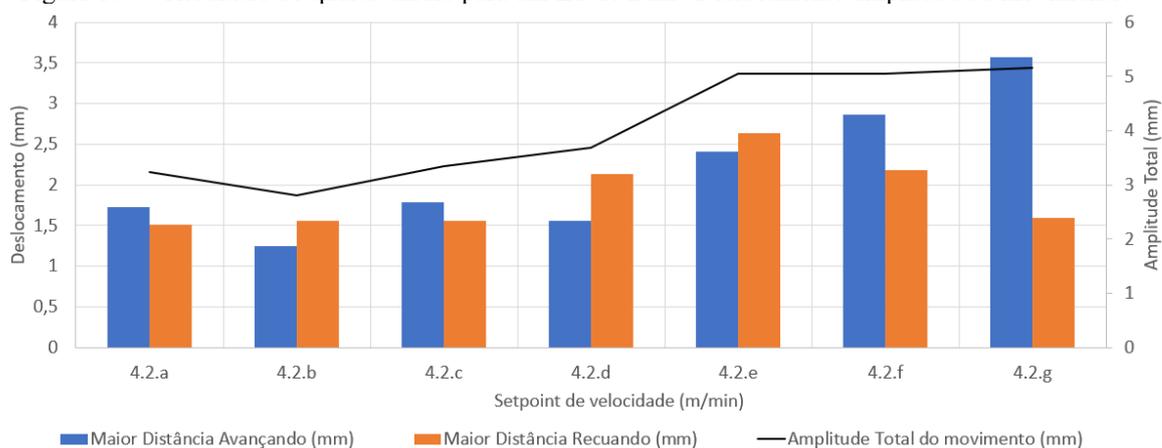
A análise da Figura 160 revelou uma consequência indesejada, todos os tempos de reposta mensurados, ultrapassaram o limiar de 1,5 ms. O ensaio 4.2.a apresentou o melhor cenário, dentre seus pares, exibindo uma média de $1,55 \pm 0,13$ ms de tempo entre o comando do driver e a resposta do motor.

Figura 158 – Resultado do quarto ensaio para um ΔT de 2 ms: Perfil de velocidade para diferentes setpoints.



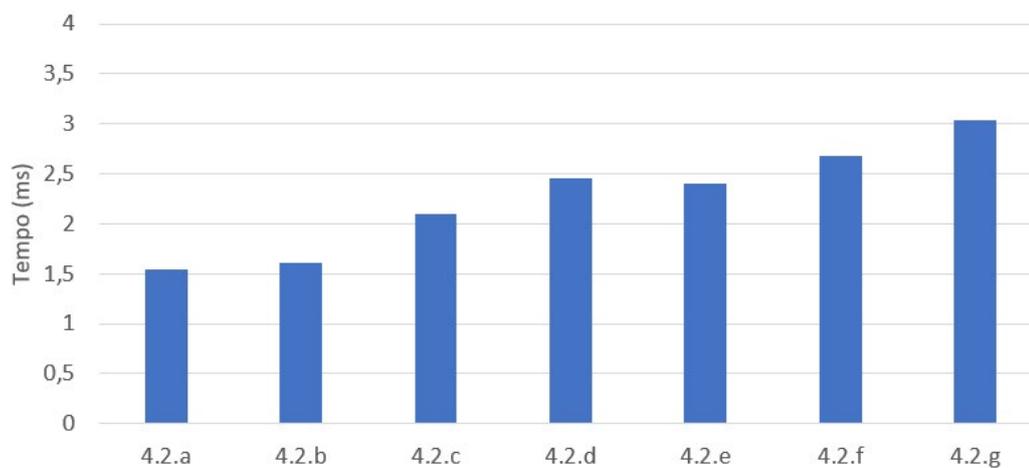
Fonte: Autor.

Figura 159 – Resultado do quarto ensaio para um ΔT de 2 ms: Deslocamento amplitude do movimento.



Fonte: Autor.

Figura 160 – Resultado do quarto ensaio para um ΔT de 2 ms: Tempo entre comando do driver e resposta do motor.



Fonte: Autor.

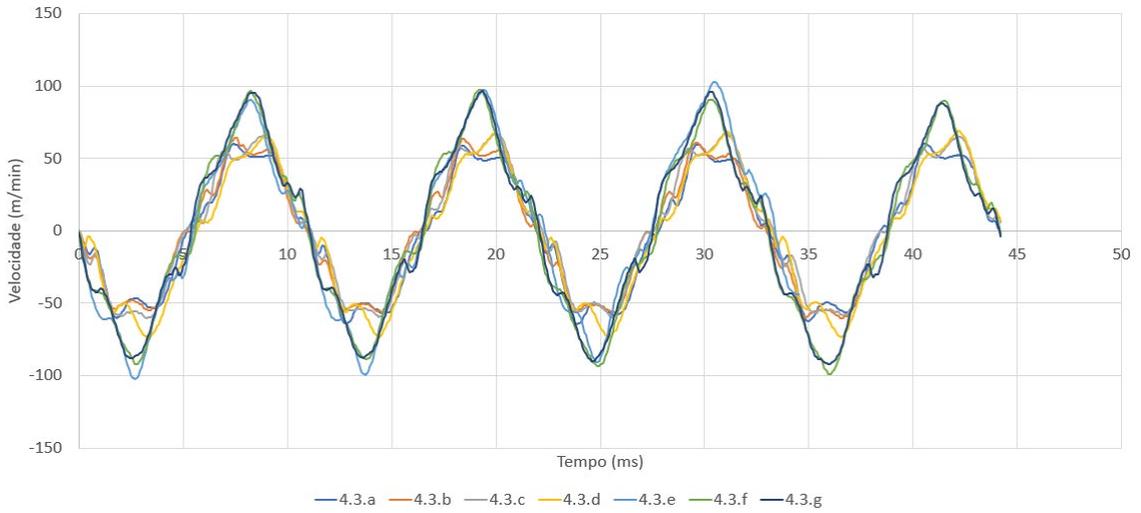
Ensaio 4.3, ΔT de 3 ms:

O ensaio 4.3 apresentou um aumento significativo na velocidade máxima de arame, registrada na Figura 161, atingindo relevantes 100 m/min durante o ensaio 4.3.g. O deslocamento foi impactado positivamente pelas altas velocidades, alcançando valores superiores a 5 mm nos ensaios 4.3.e, 4.3.f e 4.3.g, Figura 162.

Entretanto, é importante destacar que o tempo de resposta também foi um desafio para este ensaio. Para todas as configurações utilizadas neste ensaio o tempo de resposta excedeu 2 ms, inviabilizando o uso deste conjunto de parâmetros, Figura 163. A magnitude deste atraso pode vir a acarretar perturbações prejudiciais no processo que se desenvolve neste trabalho. Um exemplo destas perturbações é a colisão do arame no fundo da poça e fusão, devido à demora na resposta do motor ao comando de recuo do arame, durante a fase de curto-circuito. Ocorrência conhecida na literatura como *stubbing*.

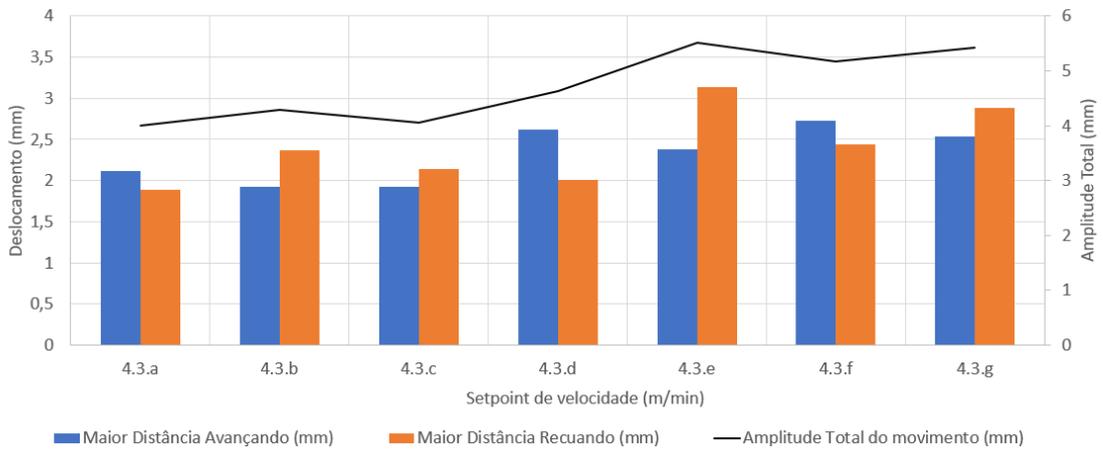
Ainda que os resultados tenham apresentado melhorias em termos de velocidade máxima atingida e amplitude total do movimento, o problema relacionado ao tempo de resposta persiste. O tempo de resposta do motor deve ser menor para que os parâmetros sejam viáveis para o processo MIG-AD.

Figura 161 – Resultado do quarto ensaio para um ΔT de 3 ms: Perfil de velocidade para diferentes configurações.



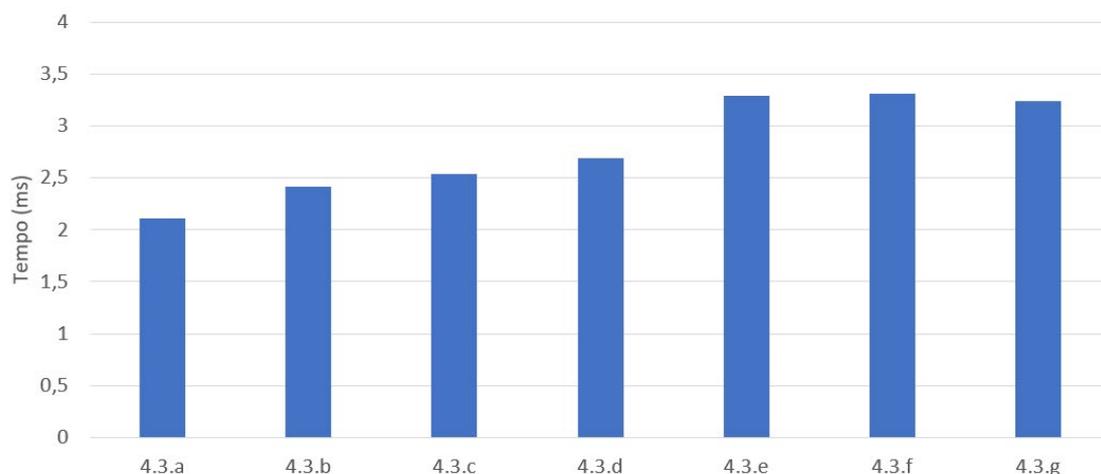
Fonte: Autor.

Figura 162 – Resultado do quarto ensaio para um ΔT de 3 ms: Deslocamento amplitude do movimento.



Fonte: Autor.

Figura 163 – Resultado do quarto ensaio para um ΔT de 3 ms: Tempo entre comando do driver e resposta do motor.



Fonte:

Autor.

Ensaio 4.4, ΔT de 4 ms:

O perfil de velocidade obtido no ensaio 4.4 é apresentado na Figura 164. É notável que em nenhum dos testes realizados no ensaio 4.4 foi constatado uma significativa redução da aceleração antes da reversão. A redução da aceleração antes da reversão se apresentou como uma aliada na redução do tempo de resposta do motor.

Quando comparamos o desempenho do ensaio 4.4. com seus pares do ensaio 4, é seguro afirmar que o 4.4. se destaca ao obter o maior deslocamento médio com maiores patamares, excedendo 6 mm no teste 4.4.e, Figura 165. Porém, os resultados obtidos com o tempo de resposta não surpreendem, sendo perceptivelmente elevados em todos os testes realizados no ensaio 4.4., com todos os valores superiores a 2,5 ms, Figura 166.

Figura 164 - Perfil de velocidade para as diferentes configurações do ensaio 4.4

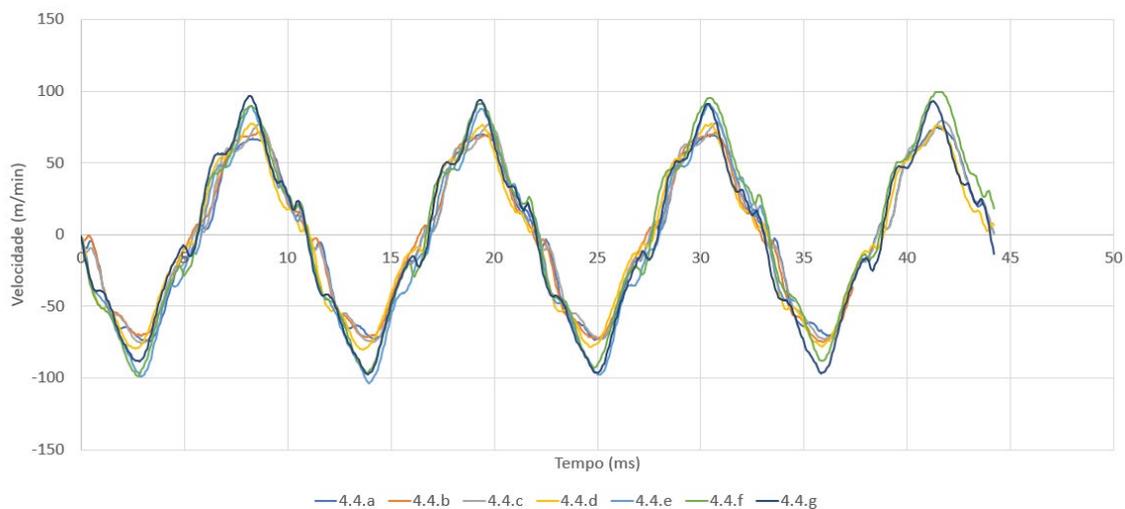


Figura 165 - Deslocamento e amplitude total do movimento do ensaio 4.4

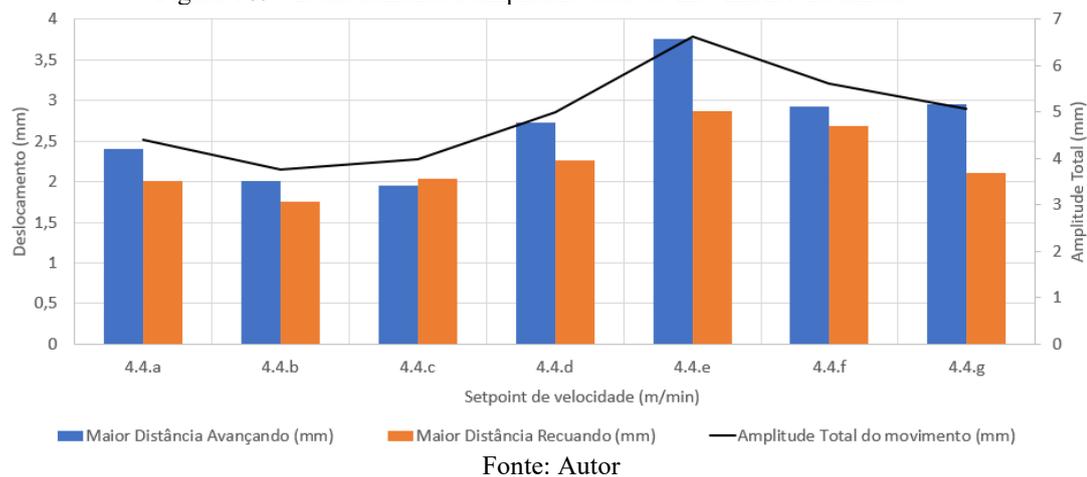
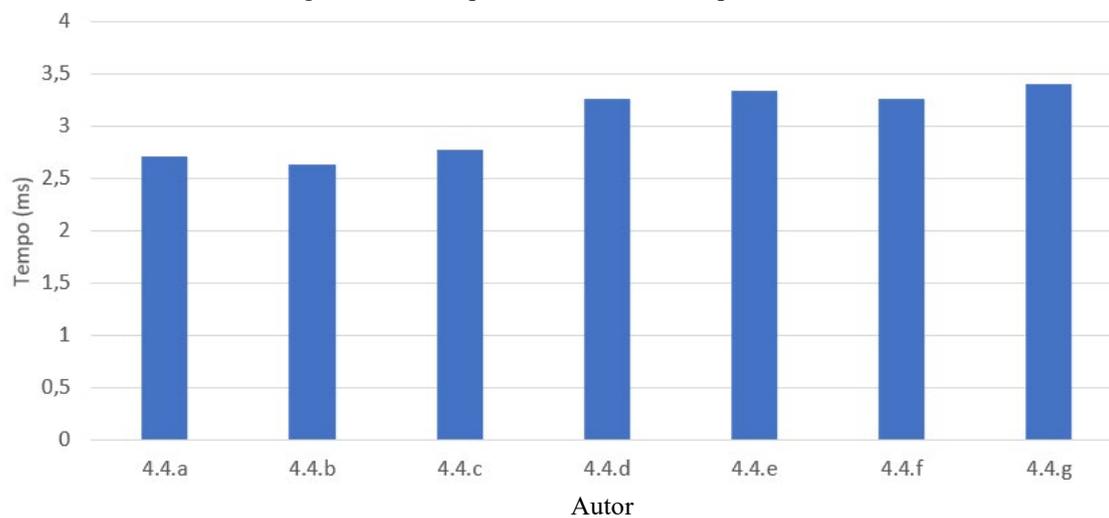


Figura 166 - Tempo entre comando e resposta do ensaio 4.4



Conclusão do ensaio 4:

Ainda que extenso, o ensaio 4 obteve um panorama fundamental para o entendimento do comportamento do motor. Ao submeter o motor a diferentes condições de velocidade durante o movimento de avanço e recuo em alta frequência, foi possível manipular a aceleração do motor, assim obtendo diferentes perfis de movimento.

Os testes empregando valores de ΔT de 1 e 2 ms, apresentaram uma melhora significativa no tempo de resposta do motor em relação aos comandos do driver. Para efeito de comparação podemos recorrer ao ensaio 3, o qual não utilizou a estratégia de redução da aceleração antes da reversão. Neste contexto, o ensaio 3 obteve um tempo de resposta médio de 3,4 ms, enquanto o ensaio 4.1.a registrou 1,39 ms. Este resultado reforça a necessidade de se reduzir a aceleração antes do momento da reversão.

O resultado obtido com o ensaio 4.3 e 4.4, apesar de não ser aplicável no processo MIG-AD, oferece uma contribuição relevante para o desenvolvimento do sistema de alimentação dinâmica. A confirmação de que a redução da aceleração momentos antes do comando de reversão do motor permite um menor tempo de resposta entre o comando do driver e a resposta do motor. Esta afirmação tem como base a crescente no tempo de resposta do motor, junto a evolução do parâmetro ΔT deste ensaio.

As consequências da redução da aceleração, como uma menor velocidade e principalmente um menor deslocamento, são um desafio. Se faz necessário obter o máximo desempenho do motor para superar os resultados obtidos até agora.