

Thiago Resende Larquer

**DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE UM
SISTEMA PARA SINCRONIZAÇÃO DA ALIMENTAÇÃO
DE ARAME PULSADA COM A CORRENTE DE
SOLDAGEM NO PROCESSO TIG**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2026

Thiago Resende Larquer

**DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA PARA
SINCRONIZAÇÃO DA ALIMENTAÇÃO DE ARAME PULSADA COM A
CORRENTE DE SOLDAGEM NO PROCESSO TIG**

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

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Ruham Pablo Reis

UBERLÂNDIA - MG

2026

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

-
- L332d
2026
- Larquer, Thiago Resende, 1985-
Desenvolvimento e avaliação de um sistema para sincronização da
alimentação de arame pulsada com a corrente de soldagem no processo
TIG [recurso eletrônico] / Thiago Resende Larquer. -- 2026.
- Orientador: Ruham Pablo Reis.
Tese (Doutorado) -- Universidade Federal de Uberlândia, Programa
de Pós-graduação em Engenharia Mecânica.
Modo de acesso: Internet.
Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.te.2026.11007>
Inclui bibliografia.
Inclui ilustrações.
1. Engenharia mecânica. I. Reis, Ruham Pablo, 1979-, (Orient.). II.
Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-graduação em
Engenharia Mecânica. III. Título.

CDU: 621

André Carlos Francisco
Bibliotecário(a)-Documentalista - CRB-6/3408



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Mecânica

Av. João Naves de Ávila, nº 2121, Bloco 1M, Sala 212 - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-MG, CEP 38400-902

Telefone: (34) 3239-4282 - www.posmecanicaufu.com.br - secposmec@mecanica.ufu.br



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Mecânica				
Defesa de:	Tese de Doutorado Acadêmico, número 423, PPGEM				
Data:	3 de agosto de 2026	Hora de início:	15:30	Hora de encerramento:	19:30
Matrícula do Discente:	12223EMC007				
Nome do Discente:	Thiago Resende Larquer				
Título do Trabalho:	Desenvolvimento e Avaliação de um Sistema para Sincronização da Alimentação de Arame Pulsada com a Corrente de Soldagem no Processo TIG				
Área de concentração:	Materiais e Processos de Fabricação				
Linha de pesquisa:	Processos de Fabricação (Usinagem e Soldagem)				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Abordagens de Gerenciamento Térmico para Manufatura Aditiva por Deposição a Arco - FAPEMIG APQ-01225-22				

Reuniu-se por videoconferência, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, assim composta: Professores Doutores: Mateus Barancelli Schwedersky - UFSC; Leandro João da Silva - UFPR; Luiz Eduardo dos Santos Paes - FEMEC/UFU; Rosemar Batista da Silva - FEMEC/UFU e Ruham Pablo Reis - FEMEC/UFU, orientador(a) do(a) candidato(a).

Iniciando os trabalhos o(a) presidente da mesa, Dr. Ruham Pablo Reis, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato(a), agradeceu a presença do público, e concedeu ao Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovado(a).

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Ruham Pablo Reiser, Professor(a) do Magistério Superior**, em 04/08/2026, às 15:29, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Mateus Barancelli Schwedersky, Usuário Externo**, em 04/08/2026, às 16:00, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **LEANDRO JOAO DA SILVA, Usuário Externo**, em 04/08/2026, às 17:27, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Luiz Eduardo dos Santos Paes, Professor(a) do Magistério Superior**, em 04/08/2026, às 17:43, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Rosemar Batista da Silva, Professor(a) do Magistério Superior**, em 05/08/2026, às 12:11, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **7560002** e o código CRC **41966D8D**.

Dedico,

À minha esposa, Ludiele.

Aos meus filhos, Pedro e Luísa.

Aos meus pais, irmãos e familiares.

“Se vi mais longe, foi por estar sobre ombros de gigantes.”

ISAAC NEWTON

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida, pela saúde e por me conceder força, sabedoria e perseverança para superar os desafios encontrados ao longo desta caminhada.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Ruham Pablo Reis, pela orientação, confiança, disponibilidade e pelos valiosos ensinamentos compartilhados durante todo o desenvolvimento deste trabalho. Sua companhia durante a realização dos experimentos e a redação da tese foi fundamental para a conclusão deste trabalho, e levo comigo uma amizade que vai muito além desta jornada acadêmica.

Aos professores, técnicos, pesquisadores e colaboradores do Laprosolda/UFU, em especial ao colega Vinícius Lemes Jorge, que contribuíram direta ou indiretamente para o desenvolvimento desta pesquisa, seja na execução dos experimentos, na construção dos equipamentos ou nas discussões técnicas, agradeço pelo apoio técnico e pela convivência ao longo deste período.

Ao Instituto Federal do Triângulo Mineiro (IFTM), pela oportunidade de desenvolvimento profissional e pelo incentivo à qualificação de seus servidores, bem como pelo suporte oferecido para a realização deste doutorado. Às colegas no grupo de pesquisa Ladestec, que incentivaram a realização desta qualificação.

Ao Centro Universitário de Patos de Minas (UNIPAM) que, por intermédio da Profa. Janaína Aparecida Pereira, disponibilizou, em um momento difícil, o laboratório de fabricação para que pudesse realizar os primeiros experimentos deste trabalho.

Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, dentro do qual essa tese foi desenvolvida, e também à CAPES, CNPq (Projeto 305636/2021-9) e FAPEMIG (Projeto APQ-01225-22), pelo apoio ao referido programa de pós-graduação e aos projetos relacionados ao desenvolvimento desta tese.

À minha esposa, Ludiele, pelo amor, companheirismo, compreensão e apoio durante todos esses anos. Obrigado por compreender as inúmeras horas dedicadas ao trabalho, às viagens e à pesquisa.

Aos meus filhos, Pedro e Luísa, por serem minha maior inspiração e a razão de cada esforço realizado. Mesmo sem compreenderem completamente a dimensão desta jornada, foram eles que deram sentido a cada etapa vencida.

Aos meus pais, irmãos e familiares, pelo incentivo, pelos ensinamentos e pelo apoio permanente ao longo da minha formação pessoal e profissional.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização desta tese. Cada incentivo, conselho, colaboração e gesto de apoio foi importante para que este trabalho pudesse ser concluído.

LARQUER, R. T. **Desenvolvimento e Avaliação de um Sistema para Sincronização da Alimentação de Arame Pulsada com a Corrente de Soldagem no Processo TIG**. 168 f. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Minas Gerais, Brasil.

RESUMO

A alimentação pulsada (dinâmica) de arame pode modificar a poça de fusão, a transferência metálica e o aporte térmico em processos de soldagem a arco. Entretanto, apesar de algumas soluções comerciais já explorarem tecnologias do tipo, elas são baseadas em alimentadores e/ou tochas proprietárias. Além disso, estudos avaliando a pulsação do arame sincronizada à corrente de soldagem ainda são escassos, o que também motivou o desenvolvimento desta tese. Assim, o objetivo deste trabalho foi desenvolver e avaliar um dispositivo compatível com alimentadores e tochas convencionais e com ajuste independente de frequência e amplitude para pulsação da alimentação de arame no processo TIG e investigar os efeitos do sincronismo entre a pulsação da alimentação e a corrente nos depósitos resultantes. A metodologia do trabalho foi organizada em etapas sequenciais. Primeiramente efetuou-se a construção e caracterização do dispositivo pulsador baseado na flexão cíclica de parte do conduto do arame. Em seguida, levantou-se um envelope de trabalho do processo TIG com alimentação pulsada. Na sequência implementou-se o sincronismo entre a pulsação do arame e a corrente utilizando com base na tensão eletrodo-aramé. Com isso, avaliou-se os efeitos dos parâmetros de pulsação do arame e do modo de corrente sobre a geometria dos cordões formados. Ao final, avaliou-se características geométricas, metalúrgicas, químicas e térmicas dos depósitos produzidos. A caracterização do pulsador demonstrou amplitudes de pulsação de 2 a 15 mm em frequências de até 25 Hz, com tolerância para diferentes materiais e diâmetros do arame. A alimentação pulsada modificou a geometria dos cordões, sendo a frequência de pulsação do arame o parâmetro de maior influência e o contato da ponta do arame no metal de base no fundo da poça (*wire stubbing*) o limitador operacional em baixa corrente e alta velocidade de alimentação sob corrente constante. O sistema de sincronismo apresentou latência inferior a 10 ms e permitiu operar de forma estável em condições antes inviáveis sob corrente constante e alimentação pulsada, ampliando o envelope de trabalho do processo de soldagem. Sob corrente pulsada sincronizada com alimentação pulsada, o aumento da frequência de 2 para 15 Hz reduziu a largura do cordão em aproximadamente 20%, a penetração em 17% e a diluição em 20%. Na avaliação com arame ER2594, o sincronismo permitiu elevar em aproximadamente 30% a velocidade de alimentação em relação ao limite obtido com corrente constante e alimentação pulsada, sob energia de soldagem equivalente. Os depósitos sincronizados apresentaram maior largura e reforço, menor penetração e diluição, melhor preservação de Cr e Ni e regime térmico mais brando, sem diferenças relevantes de dureza e balanço ferrita/austenita. Conclui-se que o dispositivo desenvolvido, associado à estratégia de sincronismo, possibilita ampliar a capacidade de deposição e melhorar características dos depósitos, abrindo perspectivas para aplicações em revestimentos e manufatura aditiva, por exemplo.

Palavras-chave: soldagem TIG; alimentação de arame pulsada; alimentação de arame dinâmica; sincronismo; envelope de trabalho.

LARQUER, R. T. **Development and Evaluation of a System for Synchronization of Pulsed Wire Feeding with Welding Current in the TIG Process.** 168 f. PhD Thesis, Federal University of Uberlândia, Uberlândia, Minas Gerais, Brazil.

ABSTRACT

Pulsed (dynamic) wire feeding can modify the weld pool, metal transfer and heat input in arc welding processes. However, although some commercial solutions already exploit such technologies, they rely on proprietary feeders and/or torches. Furthermore, studies evaluating wire pulsation synchronized with the welding current remain scarce, which also motivated the development of this thesis. Thus, the objective of this work was to develop and evaluate a device compatible with conventional feeders and torches and with independent adjustment of frequency and amplitude for wire feed pulsation in the TIG process and to investigate the effects of synchronization between wire feed pulsation and current on the resulting deposits. The work methodology was organized into sequential stages. First, a pulsation device was built and characterized based on the cyclic deflection of part of the wire conduit. Next, a working envelope for the TIG process with pulsed wire feeding was established. Synchronization between wire pulsation and current was then implemented based on the electrode-to-wire voltage. The effects of wire pulsation parameters and current mode on bead geometry were subsequently evaluated. Finally, geometric, metallurgical, chemical, and thermal characteristics of the deposits produced. Characterization of the pulsation device demonstrated pulsation amplitudes of 2 to 15 mm at frequencies of up to 25 Hz, with tolerance for different wire materials and diameters. The pulsed feeding modified the bead geometry, being wire pulsation frequency the parameter with the greatest influence and wire stubbing (contact of the wire tip with the base metal at the bottom of the weld pool) the operational limiting factor at low current and high wire feed speed under constant current. The synchronization system achieved latency below 10 ms and enabled stable operation at boundaries previously unviable under constant current with pulsed feeding, thereby expanding the process working envelope. Under pulsed current synchronized with pulsed wire feeding, increasing frequency from 2 to 15 Hz reduced bead width approximately by 20%, penetration by 17%, and dilution by 20%. In the evaluation with the ER2594 wire, synchronization enabled an approximately 30% increase in wire feed speed compared with the limit achieved with constant current and pulsed feeding under an equivalent welding energy. Furthermore, synchronization yielded deposits with larger width and reinforcement, lower penetration and lower dilution, better preservation of Cr and Ni, with no relevant differences in hardness and ferrite/austenite balance. Thus, it is concluded that the developed device, combined with the synchronization strategy, can increase deposition capacity and improve deposit characteristics, opening up prospects for applications such as cladding and additive manufacturing, for instance.

Keywords: TIG welding; pulsed wire feeding; dynamic wire feeding; synchronism; working envelope.

Sumário

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO	11
1.1 Contextualização	11
1.2 Motivação	11
1.3 Objetivos	12
1.3.1 Objetivo geral	12
1.3.2 Objetivos específicos	12
1.4 Contribuições da Tese	13
1.5 Estrutura do Documento	13
CAPÍTULO II - METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA	14
2.1 ETAPA A - Revisão Bibliográfica	15
2.2 ETAPA B - Desenvolvimento e avaliação do pulsador de arame	15
2.3 ETAPA C - Definição e avaliação do envelope de trabalho	15
2.4 ETAPA D - Desenvolvimento e avaliação dos métodos de sincronismo	16
2.5 ETAPA E - Caracterização do sincronismo e avaliação de potencial	16
2.6 ETAPA F - Avaliação metalúrgica e termográfica dos depósitos	16
2.7 Síntese da Estratégia Metodológica	17
CAPÍTULO III - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
3.1 Processos derivativos e motivação para a pulsação da alimentação de arame	18
3.2 Origem e evolução histórica da alimentação pulsada	19
3.3 Equipamentos comerciais baseados em alimentação pulsada	19
3.3.1 TIPTIG®	19
3.3.2 tigSpeed®	20
3.3.3 TOPTIG®	21
3.3.4 CMT® - <i>Cold Metal Transfer</i>	21
3.3.5 Sistemas comerciais com controle dinâmico da alimentação de arame	23
3.4 Trabalhos acadêmicos sobre alimentação pulsada	24
3.4.1 Observações preliminares e caracterização do processo	24
3.4.2 Comportamento da transferência metálica e estabilidade do processo	26
3.4.3 Geometria do cordão, microestrutura e propriedades do depósito	27
3.4.4 Monitoramento e sincronismo da corrente de soldagem e o arame de adição	29
3.5 Patentes sobre mecanismos de pulsação da alimentação de arame	33
3.5.1 Mecanismos baseados em eletroímãs	33
3.5.2 Mecanismos mecânicos (alimentadores não convencionais)	34
3.5.3 Mecanismos por variação do comprimento da trajetória do arame	34
3.5.4 Mecanismo por vibração longitudinal do conjunto tracionador	34
3.5.5 Síntese crítica das patentes	35
3.6 Lacunas na literatura e posicionamento da presente tese	35
3.7 Quadro-resumo dos parâmetros extraídos da literatura	36

CAPÍTULO IV - DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DO DISPOSITIVO DE PULSAÇÃO DA ALIMENTAÇÃO DE ARAME.....	38
4.1 Princípio de Funcionamento.....	38
4.2 Descrição do Protótipo.....	40
4.3 Desenvolvimento do Hardware.....	40
4.3.1 Motor de acionamento e driver.....	40
4.3.2 Plataforma de controle.....	41
4.3.3 Placa de condicionamento de sinais.....	42
4.4 Avaliação de Desempenho do Dispositivo Pulsador.....	42
4.5 Resultados de Amplitude e Frequência de Pulsação.....	44
4.5.1 Amplitude de pulsação.....	46
4.5.2 Frequência de pulsação.....	50
4.6 Considerações Parciais.....	51
CAPÍTULO V - DEFINIÇÃO E AVALIAÇÃO DO ENVELOPE DE TRABALHO.....	52
5.1 Materiais e Métodos.....	52
5.2 Definição do Envelope de Trabalho.....	53
5.3 Planejamento experimental e resultados.....	57
5.4 Efeito sobre a geometria dos cordões.....	58
5.4.1 Reforço do cordão.....	58
5.4.2 Largura do cordão.....	60
5.4.3 Diluição.....	62
5.4.4 Penetração e morfologia do cordão.....	64
5.4.5 Ocorrência de porosidade.....	67
5.4.6 Aspecto superficial.....	69
5.5 Considerações Parciais.....	71
CAPÍTULO VI - SISTEMA DE SINCRONISMO: CONCEPÇÃO, IMPLEMENTAÇÃO E VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL.....	72
6.1 Motivação e Conceito de Sincronismo.....	73
6.2 Arquitetura do Sistema.....	74
6.2.1 Aquisição de Sinais.....	74
6.2.2 Hardware e Integração com a Fonte de Soldagem.....	75
6.2.3 Software de Sincronismo.....	76
6.3 Materiais e Métodos.....	80
6.3.1 Montagem Geral.....	80
6.3.2 Planejamento Experimento 1 - Avaliação Exploratória por Grupos (A a F).....	81
6.3.3 Planejamento Experimento 2 - Avaliação do sincronismo corrente-aramé.....	83
6.4 Resultados e Discussão.....	84
6.4.1 Resultados e Discussão - Experimento 1.....	84
6.4.2 Resultados e Discussão - Experimento 2.....	94
6.4.3 Validação Visual do Sincronismo por Filmagem de Alta Velocidade.....	101
6.5 Considerações Parciais.....	111

CAPÍTULO VII - CARACTERIZAÇÃO DO SINCRONISMO: AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE DE DEPOSIÇÃO, ASPECTOS METALÚRGICOS E TERMOGRÁFICOS.....	112
7.1 Considerações Iniciais e Objetivo do Capítulo.....	112
7.2 Material e Métodos.....	113
7.2.1 Material de adição.....	113
7.2.2 Metal de base e dimensões dos corpos de prova	114
7.2.3 Condições de deposição e planejamento experimental.....	114
7.2.4 Bancada Experimental	115
7.2.5 Determinação da velocidade limite de alimentação do arame de adição	116
7.2.6 Técnicas de análise	117
7.3 Resultados e Discussão	123
7.3.1 Capacidade de deposição e estabilidade operacional.....	123
7.3.2 Características geométricas dos cordões.....	127
7.3.3 Dureza	132
7.3.4 Diluição química.....	139
7.3.5 Balanço de fases (ferrita/austenita).....	145
7.3.6 Análise termográfica	151
7.4 Conclusões parciais	157
CAPÍTULO VIII - CONCLUSÕES.....	158
CAPÍTULO IX - TRABALHOS FUTUROS.....	162
CAPÍTULO X - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	164
ANEXO 1	169

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

A soldagem a arco elétrico constitui uma das tecnologias mais difundidas na indústria metalomecânica, presente em praticamente todas as cadeias produtivas que envolvem a fabricação de peças e estruturas metálicas. Dentre os processos a arco, o TIG (*Gas Tungsten Arc Welding* - GTAW) e o MIG/MAG (*Gas Metal Arc Welding* - GMAW) destacam-se pela qualidade das juntas produzidas e pela versatilidade de aplicação, respectivamente. Em ambos os casos, a forma como o metal de adição é alimentado à poça de fusão é determinante para a dinâmica do arco, geometria do cordão de solda, aporte térmico transferido à peça e produtividade da operação.

Nesse cenário, a pulsação da alimentação de arame (técnica na qual ao avanço contínuo do arame é sobreposta uma componente de avanço e recuo cíclico) tem despertado interesse crescente por emular manualmente a técnica de pulsação de varetas executada por soldadores experientes por melhorar a dinâmica da poça de fusão e por permitir o controle fino do aporte térmico por gota transferida. Equipamentos comerciais como o TIPTIG® (EWM), o TIGSpeed® (EWM) e o CMT® (Fronius) já exploram esse conceito, mas dependem de alimentadores ou tochas proprietárias, o que pode limitar sua adoção em instalações industriais já existentes.

1.2 Motivação

A revisão bibliográfica apresentada no Capítulo III evidencia um conjunto de lacunas relevantes relacionadas à utilização da técnica de pulsação da alimentação de arame: (i) predomínio de patentes e relatórios técnicos de equipamentos proprietários sobre artigos científicos revisados por pares; (ii) fundamentos físicos da técnica de pulsação ainda pouco estabelecidos; (iii) acoplamento recorrente entre amplitude e frequência de pulsação; e (iv) praticamente inexistência de estudos que combinem pulsação da alimentação de arame com sincronismo de corrente de soldagem. Frente a tais lacunas, parte-se da hipótese de que um dispositivo externo e modular para pulsação da alimentação de arame, compatível com alimentadores e tochas convencionais, com ajuste independente de frequência e amplitude e sincronizado com a corrente de soldagem, pode ampliar o envelope operacional do processo TIG, aumentar sua capacidade de deposição e proporcionar maior controle sobre a geometria dos cordões, contribuindo para a consolidação do conhecimento sobre a técnica e sua possível difusão industrial.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

O objetivo geral desta tese é desenvolver e avaliar um dispositivo externo para pulsação da alimentação de arame de adição, adaptável a alimentadores e tochas convencionais dos processos TIG (foco do trabalho) e MIG/MAG, com ajuste independente de frequência e amplitude, e caracterizar seus efeitos sobre a geometria do cordão de solda, bem como investigar o efeito do sincronismo entre a pulsação do arame e a corrente de soldagem.

1.3.2 Objetivos específicos

1. Projetar, construir e avaliar funcionalmente um dispositivo pulsador de arame baseado na flexão alternada de uma seção livre do conduíte, entre o alimentador e a tocha;
2. Caracterizar, por meio de filmagem em alta velocidade, as amplitudes e frequências de pulsação efetivamente entregues ao arame, em função dos parâmetros de ajuste do dispositivo, para diferentes materiais e diâmetros de arame;
3. Definir, com foco no processo TIG, um envelope de trabalho para a operação com pulsação da alimentação de arame, em função da corrente de soldagem e da velocidade de alimentação;
4. Avaliar os efeitos da frequência e da amplitude de pulsação da alimentação de arame sobre o reforço, a largura, a penetração, a diluição, a ocorrência de porosidade e o aspecto superficial dos cordões de solda;
5. Desenvolver um sistema de sincronismo entre a pulsação do arame e a corrente de soldagem, implementado em LabVIEW® e integrado à fonte de soldagem;
6. Avaliar o potencial da técnica de pulsação da alimentação de arame sincronizada com a corrente de soldagem em termos de ampliação do envelope de trabalho e de desempenho geométrico dos depósitos;
7. Caracterizar o comportamento térmico da poça de fusão sob condições sincronizadas e de referência por meio de análise termográfica e avaliar seus efeitos sobre as características geométricas, químicas e microestruturais dos depósitos.

1.4 Contribuições da Tese

As principais contribuições desta tese consistem em: a) introdução de um dispositivo pulsador da alimentação de arame externo, de baixo custo e tecnologia nacional, que amplia a acessibilidade da técnica a alimentadores e tochas já instalados; b) caracterização do envelope de trabalho da pulsação de arame no processo TIG em uma faixa de frequências (2 a 20 Hz) pouco investigada na literatura; c) desenvolvimento e comparação de duas estratégias de sincronismo entre pulsação do arame e corrente de soldagem; e d) avaliação do potencial da técnica desenvolvida para pulsação da alimentação de arame sincronizada com a corrente de soldagem.

1.5 Estrutura do Documento

O presente documento está estruturado em dez capítulos. O Capítulo I, como notado, trata da introdução ao trabalho. O Capítulo II descreve a metodologia geral adotada, organizada em seis etapas (A-F). O Capítulo III apresenta a revisão bibliográfica sobre pulsação da alimentação de arame, processos derivativos, equipamentos comerciais, trabalhos acadêmicos e patentes relevantes. O Capítulo IV apresenta o desenvolvimento e a avaliação funcional do dispositivo pulsador de arame. O Capítulo V apresenta a definição e a avaliação do envelope de trabalho para operação com pulsação da alimentação de arame (ainda sem sincronismo com a corrente de soldagem). O Capítulo VI descreve o desenvolvimento do sistema de sincronismo entre a pulsação do arame e a corrente de soldagem e a validação do sistema por meio de ensaios comparativos entre as versões desenvolvidas. O Capítulo VII apresenta a caracterização dos efeitos do sincronismo sobre o comportamento térmico da poça de fusão e as características geométricas, químicas e microestruturais dos depósitos, bem como a avaliação do potencial produtivo da técnica em relação às condições de referência. Finalmente, os Capítulos VIII e IX apresentam, respectivamente, as conclusões e as sugestões para trabalhos futuros. O Capítulo X reúne as referências bibliográficas utilizadas ao longo do trabalho.

CAPÍTULO II

METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA

O desenvolvimento geral desta tese foi estruturado em seis etapas encadeadas (A a F), de acordo com a Figura 2.1, às quais se somam duas etapas de consolidação e divulgação (G – Redação da Tese; H – Defesa). A estratégia metodológica parte da consolidação teórica sobre pulsação da alimentação de arame, passa pelo projeto e construção do dispositivo pulsador, avança para ensaios progressivamente mais complexos e culmina na caracterização dos efeitos e avaliação do potencial da técnica de pulsação da alimentação de arame sincronizada com a pulsação da corrente de soldagem. As seções seguintes descrevem o propósito e o escopo de cada etapa. A descrição detalhada dos materiais, equipamentos, parâmetros utilizados e técnicas de análise é apresentada, por questão de organização, no início de cada capítulo específico (Capítulos IV a VII).

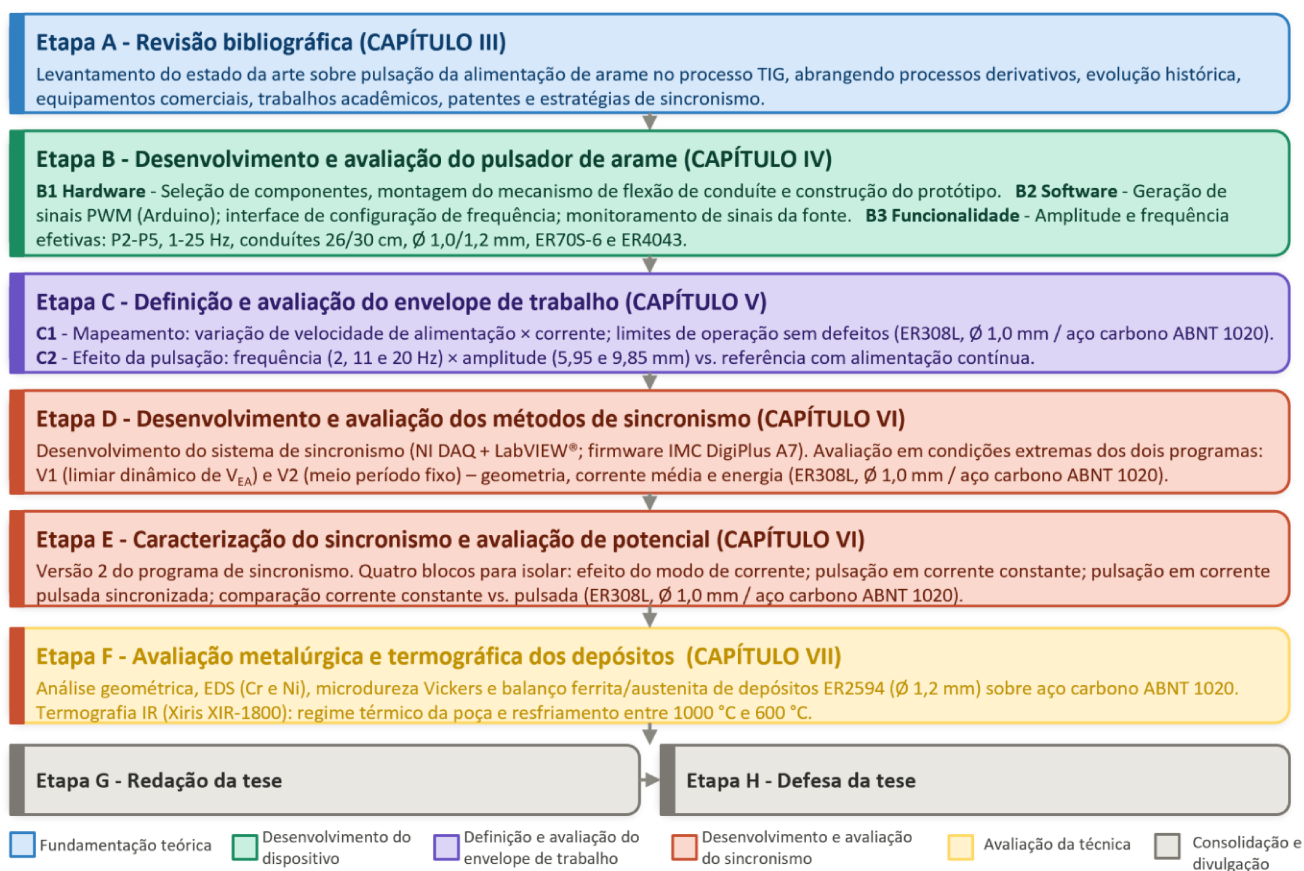


Figura 2.1 - Fluxograma de estruturação das etapas de desenvolvimento geral da tese

2.1 ETAPA A - Revisão Bibliográfica

A Etapa A compreendeu o levantamento, a análise crítica e a sistematização do estado da arte sobre a pulsação da alimentação de arame de adição em processos de soldagem a arco elétrico, com ênfase no processo TIG. O levantamento foi organizado em seis eixos temáticos: contextualização dos processos derivativos; origem e evolução histórica da técnica; equipamentos comerciais disponíveis; trabalhos acadêmicos relevantes; patentes sobre mecanismos de pulsação; e sincronismo entre pulsação do arame e corrente de soldagem. Para cada eixo, os trabalhos foram agrupados por similaridade de abordagem, permitindo identificar tendências, sobreposições e lacunas na literatura. O produto consolidado desta etapa é o Capítulo III, que fundamenta teoricamente as etapas subsequentes e delimita o escopo do dispositivo proposto (em particular), a necessidade de ajuste independente entre frequência e amplitude de pulsação, a ausência de soluções não proprietárias e a carência de sistemas de controle ativo para o sincronismo entre a pulsação do arame e a corrente de soldagem.

2.2 ETAPA B - Desenvolvimento e avaliação do pulsador de arame

A Etapa B consistiu na concepção, construção e avaliação funcional do dispositivo pulsador de arame, sendo subdividida em quatro subetapas:

- B1 - Desenvolvimento do hardware: seleção de componentes mecânicos e eletrônicos (motor, driver, fonte de alimentação, placa de controle, placa de condicionamento de sinais), montagem do mecanismo de flexão do conduíte e montagem do protótipo.
- B2 - Desenvolvimento do software: implementação, em microcontrolador Arduino, da geração dos sinais de pulso (PWM), direção e habilitação do driver, com interface para configuração de frequência, e desenvolvimento do sistema de monitoramento de sinais da fonte de soldagem.
- B3 - Avaliação da funcionalidade: ensaios em bancada para medir, via filmagem em alta velocidade, a amplitude e a frequência de pulsação efetivamente entregues ao arame, em função das posições P2-P5 da luva de condução, das frequências F1-F4 (1, 5, 15 e 25 Hz), dos comprimentos livres do conduíte (26 e 30 cm), dos diâmetros de arame (1,0 e 1,2 mm) e dos materiais (aço carbono ER70S-6 e alumínio ER4043).

2.3 ETAPA C - Definição e avaliação do envelope de trabalho

A Etapa C teve por objetivo estabelecer, para uma velocidade de soldagem fixa (10 cm/min), a faixa operacional (“envelope de trabalho”) em que a soldagem TIG com pulsação da alimentação de arame produz cordões aceitáveis sob corrente de soldagem constante (arames ER308L, Ø 1,0 mm; substrato aço carbono ABNT 1020). Foi dividida em duas subetapas:

- C1 - Mapeamento do envelope: testes com variação progressiva da velocidade de alimentação do arame e da corrente de soldagem, para identificar os limites em que se produzem cordões sem defeitos.
- C2 - Avaliação dos efeitos da pulsação: ensaios cruzados dentro do envelope, variando-se frequência (2, 11 e 20 Hz) e amplitude (5,95 e 9,85 mm), com comparação contra ensaio de referência com alimentação contínua (sem pulsação), com foco na resposta geométrica do cordão.

2.4 ETAPA D - Desenvolvimento e avaliação dos métodos de sincronismo

A Etapa D compreendeu o desenvolvimento do sistema de sincronização entre o dispositivo pulsador e a fonte de soldagem, mediante integração com placa de aquisição National Instruments® e software LabVIEW®, definição dos sinais de controle e atualização de firmware da fonte IMC DigiPlus A7. Em seguida, o sistema foi avaliado em condições operacionais extremas (situadas fora do envelope em corrente constante) nas quais a soldagem com pulsação do arame tornava-se inviável, seja por contato indevido entre o arame e a chapa (*wire stubbing*), seja por instabilidade do arco. Foram implementadas e comparadas duas estratégias de sincronismo: Versão 1, baseada em limiar dinâmico da tensão eletrodo-arama (V_{EA}), e Versão 2, baseada em meio período fixo de pulsação. Os resultados foram analisados quanto à geometria do cordão, à corrente média efetiva e à energia de soldagem (arama ER308L, Ø 1,0 mm; substrato aço carbono ABNT 1020).

2.5 ETAPA E - Caracterização do sincronismo e avaliação de potencial

Partindo da condição central do envelope de trabalho, a Etapa E empregou a Versão 2 do programa de sincronismo desenvolvido para aprofundar a caracterização da técnica. Quatro blocos de experimentos foram definidos para isolar, sucessivamente, o efeito do modo de corrente de soldagem, o efeito da pulsação da alimentação de arame em corrente constante, o efeito da pulsação da alimentação de arame em corrente pulsada sincronizada e a comparação entre corrente constante e pulsada sob mesmas condições de pulsação de arame (arama ER308L, Ø 1,0 mm; substrato aço carbono ABNT 1020).

2.6 ETAPA F - Avaliação metalúrgica e termográfica dos depósitos

A Etapa F destinou-se à caracterização aprofundada dos depósitos obtidos sob condições sincronizadas e de referência, com arame de aço inoxidável super duplex ER2594 (Ø 1,2 mm) sobre substrato de aço carbono ABNT 1020. Foram realizadas análises geométricas dos cordões, análise química por EDS com obtenção de perfis de Cr e Ni, ensaios de microdureza Vickers e avaliação do balanço de fases ferrita/austenita por metalografia quantitativa. Paralelamente, a análise

termográfica com câmeras de alta velocidade, inclusive com sensibilidade IR, permitiu caracterizar o regime térmico da poça de fusão, os gradientes de temperatura e as taxas de resfriamento no intervalo crítico entre 1000 °C e 600 °C, correlacionando o comportamento térmico às características microestruturais e geométricas dos depósitos. Adicionalmente, investigou-se o limite máximo de velocidade de alimentação sem ocorrência de defeitos superficiais nos cordões, comparando as condições sincronizadas e de referência com alimentação contínua, a fim de avaliar o potencial da pulsação sincronizada em ampliar a janela operacional do processo.

2.7 Síntese da Estratégia Metodológica

O encadeamento das seis etapas reflete uma estratégia de aprofundamento progressivo. A Etapa A consolida o arcabouço teórico. A Etapa B entrega o ferramental experimental principal. A Etapa C caracteriza o comportamento da técnica de pulsação da alimentação em corrente constante, delimitando o espaço seguro de parâmetros. A Etapa D introduz o sincronismo entre pulsação da alimentação de arame e corrente de soldagem como variável de controle, ampliando a faixa operacional para além do envelope em corrente constante. A Etapa E aprofunda a caracterização da técnica por meio de blocos experimentais sistemáticos. Finalmente, a Etapa F fornece a avaliação metalúrgica e termográfica completa dos depósitos, consolidando a demonstração do potencial da técnica desenvolvida. A redação da tese (Etapa G) e sua defesa (Etapa H) encerram o ciclo de trabalho.

CAPÍTULO III

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta o estado da arte sobre a pulsação da alimentação do arame de adição em processos de soldagem a arco elétrico, com ênfase no processo TIG. A revisão encontra-se organizada em seis eixos temáticos principais: (i) contextualização dos processos derivativos e motivação para a pulsação da alimentação de arame; (ii) origem e evolução histórica da técnica; (iii) equipamentos comerciais disponíveis no mercado; (iv) trabalhos acadêmicos relevantes; (v) patentes relacionadas a mecanismos de pulsação de arame; e (vi) lacunas na literatura e posicionamento da presente tese. Ao final, é apresentado um quadro-resumo com os principais parâmetros de processo/técnica utilizados pelas referências citadas.

3.1 Processos derivativos e motivação para a pulsação da alimentação de arame

O arco elétrico, formado pela ionização de um gás devido à passagem de corrente elétrica, pode ultrapassar facilmente temperaturas de 10000 K e, quando adequadamente controlado, constitui uma das ferramentas de baixo custo mais poderosas e versáteis da indústria moderna. Capaz de levar virtualmente qualquer material metálico à fusão, o arco elétrico tem sido utilizado há décadas em processos de fabricação consolidados para fundir, unir (soldagem), depositar (revestimento e manufatura aditiva), remover (goivagem) e separar (corte) peças em diferentes escalas. Com o advento da eletrônica de potência moderna, o potencial do arco elétrico para a transformação de metais tem sido refinado, notadamente nos processos TIG e MIG/MAG, nos quais a multiplicidade de combinações de formas de onda de corrente e de modalidades de alimentação de material de adição vem resultando em possibilidades e qualidades surpreendentes.

Para cada processo tradicional de soldagem a arco elétrico existem variações destinadas a atender particularidades de cada aplicação, seja na busca de melhorias na qualidade da junta soldada, seja no aumento da produtividade e/ou na viabilização de procedimentos antes impraticáveis. Tais variações podem ser classificadas como processos derivativos, cuja principal vantagem sobre processos inovativos é o fato de se basearem em uma plataforma já conhecida e testada, o que lhes confere maior aceitabilidade pela indústria. Essas variações ocorrem, em grande parte, por meio do desenvolvimento de tecnologias capazes de alterar fenômenos ocorrentes nos processos tradicionais. Nesse contexto, a forma de se fazer a adição de material tem sido alvo de melhorias nos últimos anos, com o lançamento de sistemas que promovem a pulsação (avanço e retrocesso rápido e cíclico) do metal de adição na forma de arame, tanto em soldagens manuais quanto mecanizadas/automatizadas.

A pulsação da alimentação de arame, também referida na literatura como alimentação dinâmica, parece emular a técnica manual de pulsação de varetas executada por soldadores experientes no processo TIG, podendo ser combinada ou não com pré-aquecimento do arame (aramé quente). Os principais benefícios reportados são o aumento da produtividade, a melhoria do comportamento da poça de fusão, a redução do risco de inclusões e porosidades e a diminuição do aporte térmico transferido à peça. Entretanto, os sistemas comerciais existentes apresentam a restrição de dependerem de alimentadores de arame ou tochas de soldagem proprietárias, o que pode encarecer a solução e limitar sua adoção industrial.

3.2 Origem e evolução histórica da alimentação pulsada

A pulsação da alimentação do arame foi provavelmente reportada pela primeira vez em 1982, por Rudy (1982), ao descrever a técnica denominada Dabber TIG®. Nessa técnica, faz-se uma alimentação intermitente do arame de enchimento para a poça de fusão de acordo com a corrente de soldagem: quando a corrente está em seu pulso, o arame avança e penetra a poça de fusão (mais fluida nesse instante), que o absorve; quando a fonte comuta para o nível de corrente de base, o arame recua e permite que a poça se solidifique. Essa sincronização garante que apenas uma gota/parte de material seja transferida a cada pulso de corrente e de alimentação, resultando em melhor controle sobre a formação do cordão de solda. Quando o movimento do arame é sincronizado com a corrente, o mesmo age absorvendo calor, esfriando a poça e limitando a transferência de calor para a peça. No entanto, a publicação não fornece detalhes suficientes sobre a técnica empregada, como o funcionamento do dispositivo utilizado para promover a pulsação da alimentação de arame.

Desde então, diversas abordagens foram propostas, algumas protegidas por patentes e outras já materializadas em equipamentos comerciais. Em linhas gerais, essas abordagens podem ser agrupadas em quatro grandes categorias: (i) alimentadores não convencionais baseados em eletroímãs, (ii) alimentadores não convencionais baseados em sistemas mecânicos de roletes intermitentes, (iii) mecanismos que atuam por variação do comprimento da trajetória percorrida pelo arame e (iv) sistemas que impõem vibração longitudinal ao conjunto tracionador. A seção 3.5 detalha cada uma dessas categorias.

3.3 Equipamentos comerciais baseados em alimentação pulsada

3.3.1 TIPTIG®

O TIPTIG®, originalmente patenteado por Siegfried Plasch na Áustria em 1999 e posteriormente nos Estados Unidos (PLASCH, 2014; 2016), é baseado em um sistema de alimentação de arame dotado de um conjunto de motor e mecanismo de quatro barras que promove

um efeito vibratório longitudinal no tracionador (conjunto motor/roletes) interno ao alimentador (Figura 3.1). Isso resulta na pulsação linear da alimentação de material de adição, que é complementada por um sistema de aquecimento do arame por efeito Joule. Um relatório de avaliação do TIPTIG® para aplicação em construção naval (PIKE, 2013) indica que o efeito de pulsação melhora a dinâmica da poça de fusão, conferindo-lhe maior fluidez e reduzindo o risco de inclusões e porosidades quando comparado ao processo TIG tradicional, além de aumentar a velocidade de soldagem e a taxa de deposição. Wilson (2007) afirma que o efeito dinâmico desse modo de alimentação, em controle de malha aberta, produz soldagens estáveis e controláveis, com velocidade de soldagem até três vezes superior à do processo TIG pulsado convencional, sem produção de respingos. Mas o fabricante não esclarece se o aumento de produtividade se dá pela pulsação da alimentação de arame e/ou obviamente pelo seu pré-aquecimento.

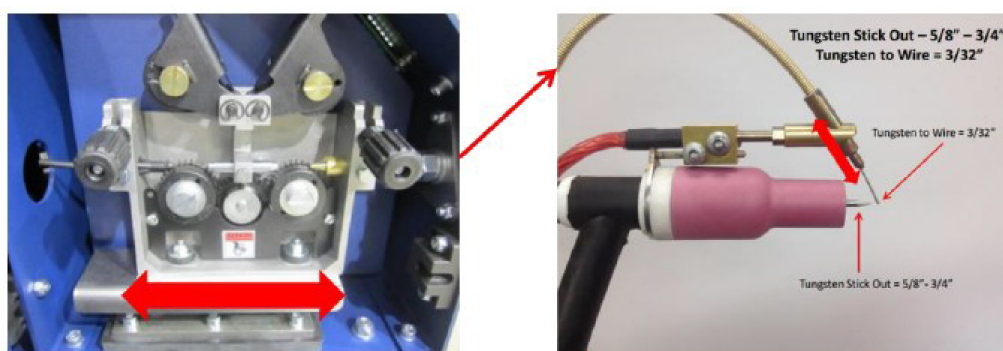


Figura 3.1 - Técnica de vibração horizontal do tracionador (conjunto motor + roletes) para pulsação da alimentação de arame utilizada no TIPTIG® (adaptado: TIP TIG TECHNICAL MANUAL V4.6)

3.3.2 tigSpeed®

O tigSpeed®, comercializado pela empresa alemã EWM (EWM, 2018), opera de forma semelhante ao TIPTIG®, sobrepondo à alimentação contínua do arame um movimento de vibração linear (avanço e recuo) do conjunto tracionador (Figura 3.2). Este equipamento está disponível em configurações com ou sem aquecimento do arame e com operação manual ou automática. O fabricante destaca que um melhor controle da poça de fusão é alcançado, com velocidades de soldagem mais altas, menor transferência de calor para a peça e maior conforto para o soldador. Mas o fabricante também não esclarece se o aumento de produtividade se dá pela pulsação da alimentação de arame e/ou pelo seu pré-aquecimento.

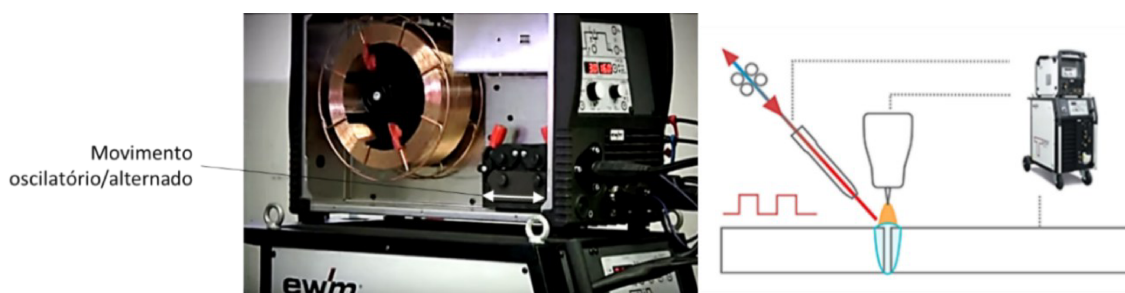


Figura 3.2 - Detalhe do equipamento para soldagem tigSpeed® (EWM, 2018)

3.3.3 TOPTIG®

O TOPTIG® é uma variante do processo TIG desenvolvida pela empresa francesa Air Liquide e atualmente comercializada pela Lincoln Electric. Sua principal característica construtiva é a integração do sistema de alimentação de arame diretamente ao bocal da tocha posicionando o metal de adição com um ângulo de inserção reduzido de 20° em relação ao eixo do eletrodo de tungstênio (Figura 3.3). Diferentemente da alimentação convencional, na qual o arame é introduzido radialmente na poça a partir de um alimentador (com um ângulo mais próximo ao metal de base), o TOPTIG® insere o arame muito próximo à ponta do eletrodo, com distância eletrodo-arama (DEA) recomendada pelo fabricante de no máximo 1,5 vezes o diâmetro do eletrodo (AIR LIQUIDE WELDING, 2008).

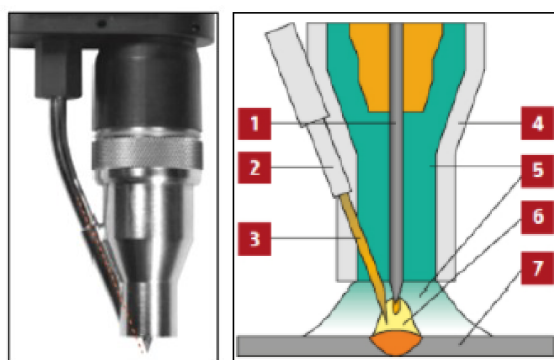


Figura 3.3 - Bocal e representação esquemática do processo TOPTIG® (1 = eletrodo de tungstênio; 2 = guia de alimentação; 3 = arame de adição; 4 = bocal de proteção; 5 = gás de proteção; 6 = arco elétrico; 7 = peça de trabalho) (adaptado: AIR LIQUIDE WELDING, 2008).

3.3.4 CMT® - *Cold Metal Transfer*

No processo MIG/MAG, a técnica mais difundida envolvendo movimento cíclico de avanço e recuo do arame-eletrodo é o CMT® (*Cold Metal Transfer*), desenvolvido pela empresa austríaca Fronius (FRONIUS, 2014). Embora, sob o ponto de vista clássico, não se enquadre como um processo estritamente pulsado, a técnica utiliza uma tocha especial (como ilustrado em um equivalente nacional – Figura 3.4) com reversão periódica do avanço do arame-eletrodo sempre que o mesmo toca a poça de fusão (curto-circuito). O sistema emprega dois conjuntos de motores e roletes tracionadores: um dianteiro, interno à tocha, que puxa e recua o arame até cerca de 70 vezes por segundo (podendo chegar a mais de 100 Hz), e um traseiro, localizado no alimentador, que empurra o arame continuamente. Entre eles, encontra-se o chamado *buffer* (ou “pulmão”) (Figura 3.5), uma parte mecanicamente passiva que acomoda a diferença entre os movimentos (velocidades) impostos pelo alimentador e pela tocha, permitindo o curvamento elástico do arame em uma seção livre de conduíte e evitando seu dobramento plástico.

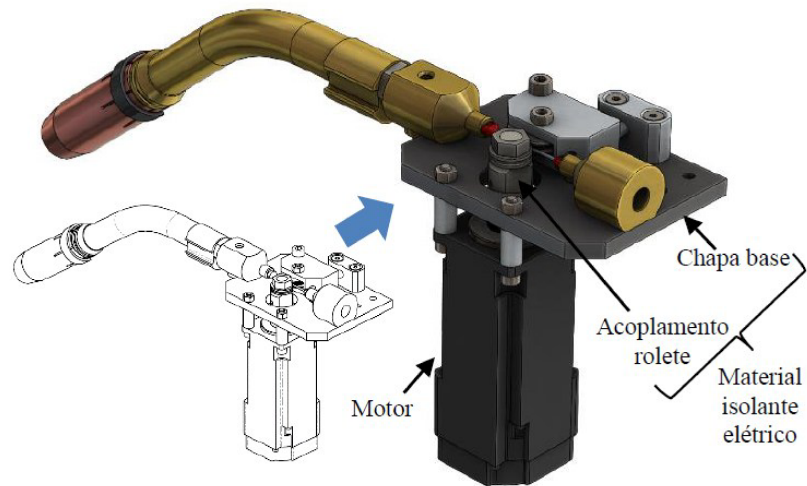


Figura 3.4 - Tocha de soldagem MIG/MAG nacional com alimentação dinâmica do arame-eletrodo (MARQUES, 2017)

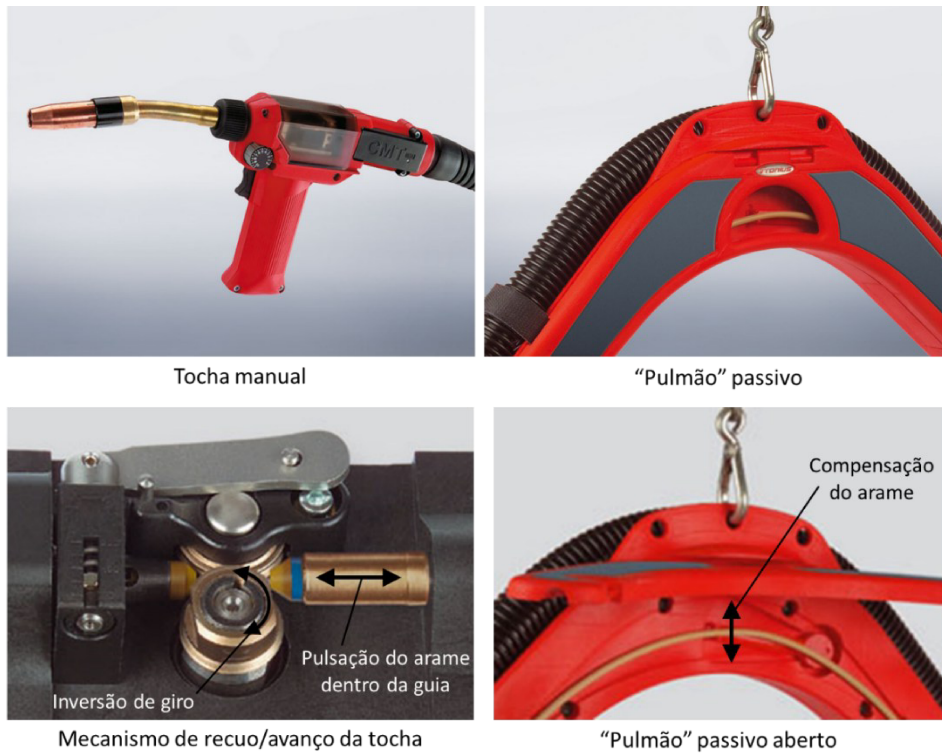


Figura 3.5 - Detalhes da tocha e do “pulmão” para soldagem MIG/MAG CMT® (SANTOS, 2016)

A reversão, associada à redução drástica da corrente durante o curto-circuito, promove uma transferência suave da gota para a poça de fusão, sem picos de corrente e sem geração de respingos. Como o arco permanece sempre curto e a corrente média é baixa, a energia calorífica transferida para a peça é reduzida.

3.3.5 Sistemas comerciais com controle dinâmico da alimentação de arame

Além dos sistemas comerciais que promovem diretamente a pulsação ou oscilação mecânica do arame, existem soluções correlatas que atuam sobre sua velocidade de alimentação em associação com as condições do processo de soldagem. Entre elas, destacam-se o sistema STA-TIG, comercializado pela IMC Soldagem, e o TIG DynamicWire®, desenvolvido pela Fronius.

O STA-TIG é um sistema de alimentação automática de arame destinado aos processos TIG e Plasma, capaz de operar com alimentação contínua ou pulsada. No modo associado à pulsação térmica, o equipamento permite estabelecer velocidades distintas de alimentação do arame durante os períodos de pulso e de base, sincronizando-as com os respectivos níveis de corrente de soldagem. A velocidade de alimentação durante a base pode, inclusive, ser ajustada para zero, fazendo com que o arame avance apenas durante o período de pulso. Dessa forma, embora constitua uma solução comercial para sincronização entre a alimentação de arame e a corrente de soldagem, seu princípio está associado à variação da velocidade de alimentação, e não à imposição de um movimento mecânico periódico de avanço e recuo da ponta do arame (IMC SOLDAGEM, 2006).

O TIG DynamicWire®, desenvolvido pela Fronius, emprega uma estratégia distinta de controle ativo da alimentação de arame. Nesse sistema, a tensão elétrica entre o arame e a peça é monitorada e utilizada como variável para regular automaticamente sua velocidade de alimentação em função das condições instantâneas do processo, considerando fatores como corrente de soldagem, comprimento do arco e geometria da junta. Essa autorregulação permite compensar variações durante a soldagem e reduz a necessidade de ajuste independente da velocidade do arame pelo operador. Apesar de atuar dinamicamente sobre a alimentação do material de adição, o próprio fabricante destaca que o DynamicWire® dispensa o movimento mecânico periódico de avanço e recuo do arame, diferenciando-o das técnicas baseadas em pulsação mecânica longitudinal (FRONIUS INTERNATIONAL, 2022).

Assim, tanto o STA-TIG quanto o DynamicWire® demonstram a aplicação comercial de estratégias de controle ativo da alimentação de arame no processo TIG. Entretanto, enquanto o primeiro sincroniza diferentes velocidades de alimentação com os períodos de pulso e de base da corrente e o segundo ajusta dinamicamente a velocidade do arame a partir das condições do processo, nenhum deles tem como princípio fundamental a imposição de um movimento oscilatório longitudinal da ponta do arame com frequência e amplitude independentemente controladas e sincronizado, em tempo real, com a corrente de soldagem.

3.4 Trabalhos acadêmicos sobre alimentação pulsada

A produção científica sobre alimentação pulsada (ou dinâmica) de arame em processos de soldagem a arco elétrico tem crescido de forma consistente ao longo dos anos, passando de estudos exploratórios em baixa frequência para caracterizações físicas detalhadas, avaliações microestruturais e aplicações em manufatura aditiva. Para melhor compreensão da evolução do campo, os trabalhos revisados são aqui organizados em quatro eixos temáticos: (i) observações preliminares e caracterização do processo; (ii) comportamento da transferência metálica e estabilidade do processo; (iii) geometria do cordão, microestrutura e propriedades do depósito, e (iv) monitoramento e sincronismo entre a corrente de soldagem e o arame de adição.

3.4.1 Observações preliminares e caracterização do processo

Um dos primeiros trabalhos publicados voltados à caracterização da alimentação dinâmica de arame no processo TIG foi realizado por Silva et al. (2018), estabelecendo bases importantes para a compreensão dos mecanismos envolvidos. O trabalho comparou três regimes (TIG autógeno, alimentação contínua e alimentação dinâmica (1-2 Hz) sobre chapas de aço carbono, revelando, por meio de termopares imersos em poças estacionárias e filmagem em alta velocidade, que o arame atua como sumidouro térmico localizado: no regime dinâmico, a extração de calor ocorre em pulsos, modulando a dinâmica de solidificação (Figura 3.6). A filmagem mostrou que, em alimentação dinâmica, a transferência ocorre preferencialmente dentro da poça, sem formação de ponte contínua – vantagem operacional relevante para soldagem fora da posição plana, pois mitiga o escorrimento por ação da gravidade. O estudo também quantificou defasagens entre o deslocamento programado e o efetivo do arame, atribuindo-as à elasticidade do conduíte e à resposta dinâmica do conjunto tracionador (dotado de variação da própria velocidade/sentido de giro dos roletes de tração), oferecendo, assim, critérios objetivos para a seleção de faixas operacionais adequadas.

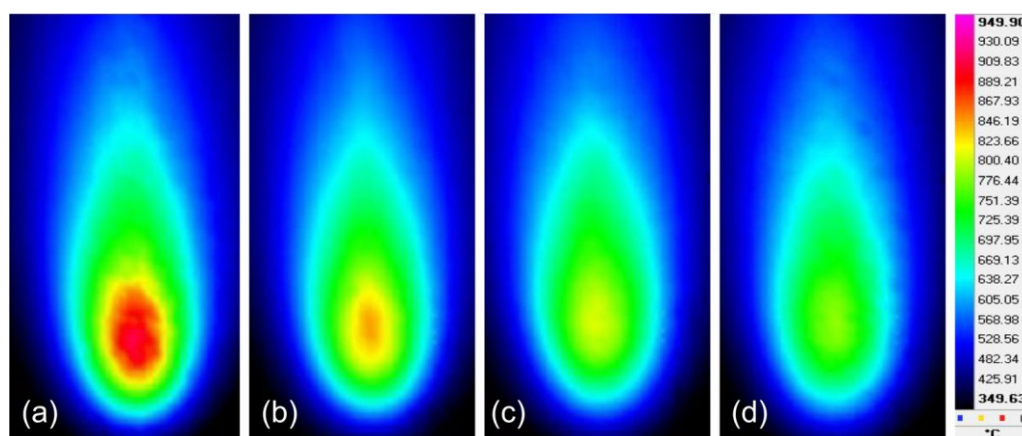


Figura 3.6 - Redução de temperatura medida durante a inserção do arame na poça (efeito de sumidouro térmico) – em (a) processo autógeno, (b) alimentação contínua, (c) alimentação dinâmica 1 Hz, e em (d) alimentação dinâmica 2 Hz (SILVA, 2018)

Em linha complementar, Paes (2016) investigou a alimentação dinâmica em soldagem TIG orbital, empregando frequências de 1 e 2 Hz e comparando os resultados ao processo autógeno e à alimentação contínua. Tal trabalho evidenciou que os cordões resultantes apresentam perfil ondulado mesmo sem pulsação de corrente, e que a disposição do conduíte é um fator operacional relevante para as características da pulsação, conclusão que delimita o alcance dos sistemas baseados em reversão do giro dos roletes de tração a baixas frequências.

Cabe deixar claro que o mecanismo de pulsação de arame adotado nos trabalhos supracitados fundamenta-se na inversão alternada do sentido de rotação dos roletes do tracionador, o que impõe restrições à faixa operacional de frequências em decorrência das limitações cinéticas do motor acionador e da inércia do conjunto mecânico. Além disso, por se tratar de um alimentador dedicado à soldagem orbital, sua aplicabilidade não se estende a sistemas comerciais convencionais. Essas características distinguem a solução da abordagem proposta na presente tese, cujo dispositivo é concebido para operar de forma independente do alimentador original, permitindo sua adaptação a qualquer sistema comercial sem necessidade de modificações no mesmo.

Neste sentido, Santos (2016) realizou uma prova de conceito para a pulsação da alimentação do arame por flexão alternada de uma seção livre de conduíte, sem depender de alimentadores proprietários (precursor do que foi realizado nessa tese). O protótipo (Figura 3.7) utilizou um disco de alumínio fixado ao eixo de um motor elétrico, com seis furos colineares ao diâmetro do disco divididos em dois grupos de três em cada hemisfério, para posicionar uma luva de deslocamento que permite variar a amplitude de oscilação. O conduíte ficou “engastado” no lado de entrada (junta de apoio) e deslizante (em uma junta prismática) no lado de saída, reduzindo os esforços para deformação do mesmo.

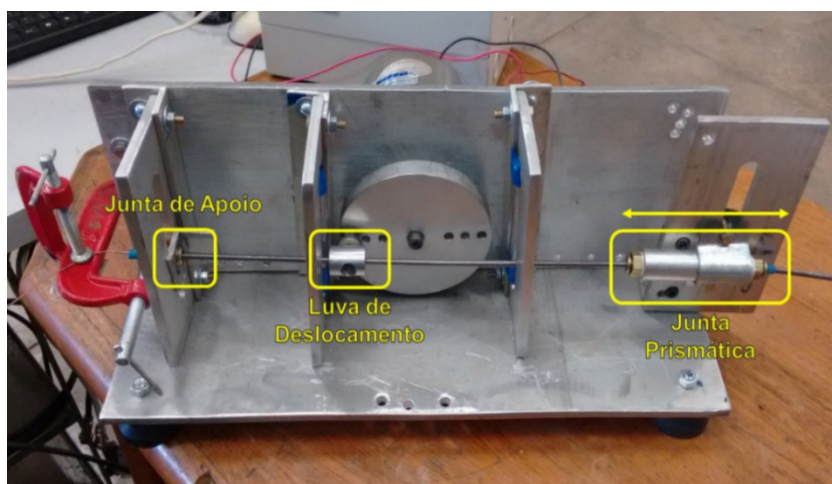


Figura 3.7 - Protótipo utilizado por Santos (2016) para realizar a pulsação do arame de adição

Apesar das limitações identificadas, especialmente a redução da frequência real de pulsação pela reação do conduíte flexionado pelo motor, o trabalho propôs uma expressão analítica aproximada para estimar o recuo do arame. Essa expressão serviu de base para o projeto e dimensionamento do dispositivo pulsador desenvolvido na presente tese.

3.4.2 Comportamento da transferência metálica e estabilidade do processo

A aplicação da alimentação dinâmica de arame à soldagem TIG orbital de tubos foi investigada por Silva et al. (2019a), que demonstraram como principal contribuição da técnica a possibilidade de operar de forma estável com baixas velocidades médias de alimentação. Nessas condições, a movimentação dinâmica do arame favorece sua interação com a poça de fusão e reduz a tendência de formação e crescimento de gotas na extremidade do material de adição, fenômeno que pode ocasionar transferência irregular e contato com o eletrodo de tungstênio, levando à sua contaminação. Dessa forma, a alimentação dinâmica amplia a estabilidade operacional do processo TIG em condições nas quais a alimentação contínua convencional apresenta limitações, podendo, adicionalmente, contribuir para o aumento da produtividade da soldagem.

A extensão desse envelope operacional para diferentes posições de soldagem foi abordada por Silva et al. (2019b), que avaliaram o comportamento da transferência metálica em quatro posições (plana, vertical descendente, vertical ascendente e sobrecabeça) para revestimento de Inconel 625 sobre aço ASTM A36, com frequência de pulsação de 20 Hz. Os resultados demonstraram que o movimento cíclico do arame promove a estabilização da transferência metálica em todas as posições avaliadas, ampliando o envelope operacional do processo.

Cunha et al. (2022) investigaram a influência das condições operacionais de transferência metálica – Transferência Intermitente (TI), Ponte Ininterrupta (PI) e Arame Enterrado (AE) – sobre a morfologia do cordão no processo TIG com alimentação pulsada do arame, variando amplitude (2, 5 e 8 mm) e frequência (2, 10 e 18 Hz). Os autores não especificam, contudo, o princípio de acionamento do dispositivo utilizado para promover a oscilação longitudinal do arame. Os resultados demonstraram que a condição operacional exerce influência preponderante sobre os efeitos da pulsação do arame. Na condição TI, a pulsação promoveu redução de penetração de até 28%, atribuída à extração de calor da poça pelo arame de adição em alta frequência. Em contrapartida, na condição PI, a introdução da oscilação com amplitude de 8 mm resultou em aumento de penetração de até 78%, com variação do perfil de convecção da poça. Para a condição AE, observou-se aumento de penetração de até 80% na frequência de 2 Hz, associado à redistribuição do aporte térmico. Quanto ao reforço e à largura, comportamentos opostos foram verificados entre as condições PI e AE, indicando a capacidade da pulsação de alterar a geometria dos cordões. A técnica proporcionou maior uniformidade da largura entre as diferentes condições avaliadas e aumento da eficiência de fusão. Os autores registraram ainda a ocorrência de porosidade na zona fundida sob as condições PI e AE, fenômeno não relatado anteriormente na literatura para o processo TIG com alimentação de arame pulsada.

Jorge et al. (2018) apresentaram o desenvolvimento e a avaliação de duas técnicas de pulsação de arame independentes de alimentadores ou tochas proprietárias: uma com acionamento eletromecânico (disco rotativo dotado de furos excêntricos, responsáveis por promover a deflexão periódica do conduíte na direção transversal ao eixo de alimentação do arame), em configuração

similar à desenvolvida por Santos (2016), e outra com acionamento eletromagnético. Testadas em TIG (15-25 Hz, amplitudes de 8-17 mm) e em MIG/MAG goticular, as técnicas produziram oscilogramas de tensão/corrente mais regulares (Figura 3.8), melhor homogeneidade do volume das gotas (confirmada por filmagem em alta velocidade) e cordões com maior regularidade de largura, penetração e altura de reforço. O estudo demonstrou, pela primeira vez no cenário brasileiro, a viabilidade de se obter os benefícios da alimentação pulsada sem dependência de sistemas TIPTIG® ou tigSpeed®, constituindo antecedente da presente tese.

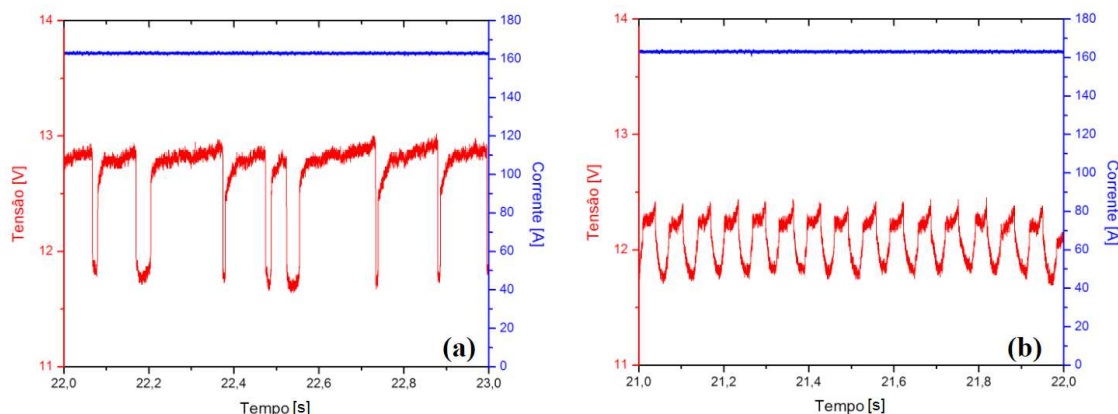


Figura 3.8 - Oscilogramas de tensão e corrente do processo TIG: (a) com alimentação contínua de arame; (b) com alimentação pulsada de arame (JORGE, 2018)

No contexto da soldagem MIG/MAG Jorge et al. (2020a) estenderam a investigação da alimentação pulsada de arame frio (*Pulsed Cold-Wire*, P-CW) ao processo com transferência goticular, variando a frequência de pulsação e o ângulo de inserção do arame, e verificaram, por filmagem de alta velocidade e termografia, que a pulsação interfere no perfil térmico externo à poça e reduz a zona termicamente afetada em altas frequências, sem alterar de modo sensível a geometria do cordão. Em complemento, Jorge et al. (2020b) realizaram um estudo sobre MIG/MAG em curto-circuito e avaliou a viabilidade técnica de operar com maior nível de tensão e pulsação do arame-eletrodo, mostrando que a técnica melhora a regularidade da transferência metálica desde que a fonte opere em modo de corrente constante. Já em outro trabalho sobre MIG/MAG, Jorge et al. (2020c) demonstraram que o aumento da frequência de pulsação intensifica o destacamento das gotas e favorece um perfil de penetração mais centralizado. Os autores concluíram ainda que esse efeito não se explica apenas pelo aumento do momento ou da energia cinética das gotas, mas também por variações de tensão superficial na poça e pela alteração da convecção de massa e calor dentro da poça. Em conjunto, esses resultados reforçam que a pulsação da alimentação de arame em MIG/MAG atua simultaneamente sobre a regularidade da transferência metálica, o comportamento térmico da poça e a geometria final do cordão, ampliando a sua janela operacional.

3.4.3 Geometria do cordão, microestrutura e propriedades do depósito

Santangelo e Silwal (2018) investigaram o efeito simultâneo da pulsação (vibração longitudinal a 16 Hz) e do aquecimento resistivo do arame (*hot-wire* – arame quente) sobre a geometria do cordão no processo TIG. Quatro combinações foram comparadas: TIG convencional, TIG com

vibração, TIG com *hot-wire* e TIG com vibração e *hot-wire*, mantendo constantes o aporte térmico, a velocidade de soldagem e de alimentação do arame de adição. Embora a associação vibração e *hot-wire* tenha elevado a taxa de desprendimento das gotas e a taxa de deposição, as alterações geométricas não foram estatisticamente significativas. A filmagem em alta velocidade mostrou pequena constrição do arco no instante do destacamento das gotas, sem deformação sustentada da coluna de plasma. Os autores concluíram que a contribuição geométrica da vibração isolada é pequena em baixa frequência, sinalizando a necessidade de explorar faixas de frequência mais elevadas, recomendação que motiva, em parte, a presente tese.

Riffel et al. (2020) investigaram o efeito da alimentação dinâmica no revestimento (*cladding*) de Inconel 625 sobre ASTM A36, abordando estabilidade, microestrutura e resistência à corrosão. As frequências avaliadas foram 0 (referência), 5 e 18 Hz em dois níveis de corrente (200 e 250 A). A análise geométrica evidenciou redução progressiva da diluição e aumento do reforço com o aumento da frequência, o que foi atribuído à ação da tensão superficial arame-poça durante o recuo do arame (Figura 3.9). A caracterização por MEV e EDS revelou que, para 250 A e 18 Hz, a segregação interdendrítica de Mo e Nb é sensivelmente reduzida, indicando refino estrutural decorrente da agitação periódica da poça. Os ensaios de polarização potenciodinâmica cíclica confirmaram ganho efetivo de resistência à corrosão nas amostras com pulsação a 18 Hz e 250 A, estabelecendo o primeiro vínculo quantitativo entre alimentação dinâmica e desempenho eletroquímico em revestimentos de Inconel.

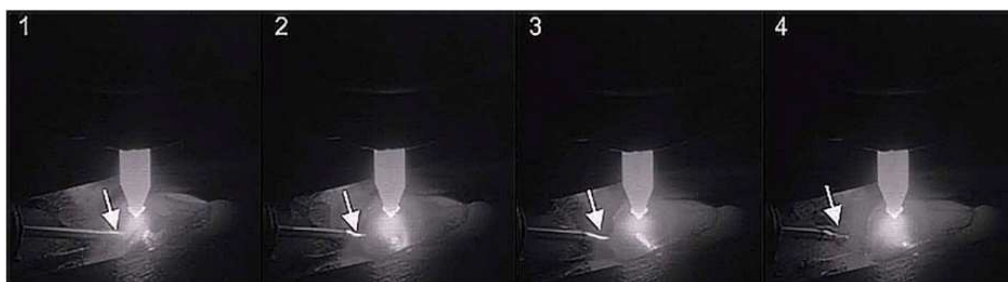


Figura 3.9 - Demonstração do efeito da tensão superficial arame-poça durante o recuo (mecanismo que “puxa” a poça) (RIFTEL, 2020)

Pigozzo et al. (2024a) compararam quatro configurações de TIG com alimentação dinâmica aplicado ao revestimento de Inconel 625: arame frio (*cold-wire*) com alimentação contínua (CW-CoWF), arame frio com alimentação dinâmica (CW-DWF), arame quente (*hot-wire*) com alimentação contínua (HW-CoWF) e arame quente com alimentação dinâmica (HW-DWF), mantendo a corrente de soldagem em 170 A, frequência de 18 Hz e velocidade de soldagem de 2,2 mm/s (13,2 cm/min). Os principais achados foram: (i) a transferência metálica com alimentação dinâmica é mais uniforme e estável quando combinada ao arame frio; (ii) o pré-aquecimento do arame aumenta a temperatura da poça, produzindo cordões mais profundos e largos; (iii) o recuo do arame durante a ponte metálica puxa o metal líquido por tensão superficial, resultando em maior reforço e menor penetração nas amostras DWF; e (iv) os revestimentos CW-DWF apresentaram menor teor de Fe na superfície, indicando menor diluição, vantagem direta para aplicações anticorrosivas no setor de óleo e gás, por exemplo.

Santangelo et al. (2016) exploraram a combinação de arame quente com pulsação da alimentação visando a depósitos mais uniformes para manufatura aditiva por deposição a arco elétrico com TIG (MADA-TIG) de grandes peças metálicas, ressaltando a importância da estabilidade do processo e do controle sobre o aporte térmico em deposições multicamadas.

A extensão da alimentação dinâmica ao processo plasma (PAW) para manufatura aditiva foi investigada por Dornelles (2022). O dispositivo de alimentação dinâmica empregado, denominado de Módulo de Alimentação Dinâmica (MAD), funciona por meio de um mecanismo biela-manivela, promovendo oscilação por meio do deslocamento do bloco de roletes tracionadores do arame. O trabalho depositou cordões únicos e paredes multicamadas de aço inoxidável 309L sobre substrato ASTM A36, empregando corrente média de 196 A, velocidade de soldagem de 15 cm/min e amplitude de oscilação de 5 mm, variando a frequência de pulsação do arame em 0, 3, 6, 9, 12 e 15 Hz. Os resultados evidenciaram que, na faixa de 12-15 Hz, os cordões apresentaram maior altura de reforço, melhor regularidade geométrica e penetração mais homogênea; em 15 Hz, observou-se ainda maior dispersão da fase ferrítica na matriz austenítica e acréscimo de aproximadamente 7,5% na microdureza, sugerindo refino microestrutural associado à agitação mecânica da poça. Esses achados foram corroborados por Silva et al. (2024), que aprofundaram a investigação do processo PAW com alimentação dinâmica para manufatura aditiva (PAW-DED) em paredes multicamadas de 309L, confirmando que com frequências mais elevadas (especialmente 12 e 15 Hz) pode-se produzir cordões (depósitos) mais altos, simétricos e com penetração mais homogênea.

3.4.4 Monitoramento e sincronismo da corrente de soldagem e o arame de adição

Um elemento até recentemente pouco explorado na literatura é a sincronização entre a pulsação da alimentação do arame e a pulsação da corrente de soldagem. Mesmo sem apresentar detalhes, Rudy (1982), já no processo Dabber TIG®, apontava para a vantagem de sincronizar o avanço e o recuo do arame com os períodos de pulso e base da corrente, de modo que o arame penetrasse a poça apenas quando esta estivesse mais fluida e recuasse durante a fase de solidificação parcial. No âmbito comercial, Fortain et al. (2008) descreveram o TOPTIG® (variante TIG com inserção coaxial do arame através da tocha) e registraram que o equipamento permite sincronizar, de fábrica, a pulsação da velocidade de alimentação com a pulsação da corrente, operando com frequências de até 200 Hz e velocidade de arame de até 10 m/min. Apesar dessa capacidade declarada, nenhum trabalho havia avaliado sistematicamente se a igualdade das frequências comandadas é condição suficiente para que o sincronismo físico da transferência metálica de fato ocorra. Nesse sentido, o sincronismo entre a pulsação da alimentação do arame e a pulsação da corrente de soldagem foi investigado por Pigozzo et al. (2022). O estudo empregou o equipamento TOPTIG® com corrente pulsada (pico de 200 A e base de 120 A) e velocidade média de alimentação de arame de 2,3 m/min, variando a frequência de pulsação da corrente e da alimentação de arame em 5, 10, 15 e 20 Hz, sendo que duas séries foram comparadas: arame

alimentado apenas no pulso de corrente (série P) e arame alimentado apenas na base de corrente (série B). Os resultados mostraram que, mesmo com frequências nominalmente iguais, a dinâmica do sistema *push-pull* e os tempos de aceleração/desaceleração do motor mantêm a transferência dessincronizada da pulsação da corrente na maioria das frequências, somente em 10 Hz (dentro de uma janela específica) ocorreu sincronia efetiva ciclo-a-ciclo, produzindo menor diâmetro de gota, maior estabilidade e melhor regularidade do cordão (Figura 3.10). Esse resultado demonstra que a simples igualdade de frequência comandada não garante sincronismo efetivo do fenômeno físico da transferência (nesse contexto, não se trata de transferência metálica no sentido convencional, mas da necessidade de favorecer a transferência completa do metal fundido formado na extremidade do arame para a poça, evitando a permanência e o crescimento da gota), indicando a necessidade de um sistema de controle que detecte os eventos de estabelecimento e ruptura da ponte metálica para modular o pulso de corrente, como inclusive é a linha de desenvolvimento utilizada nessa tese.

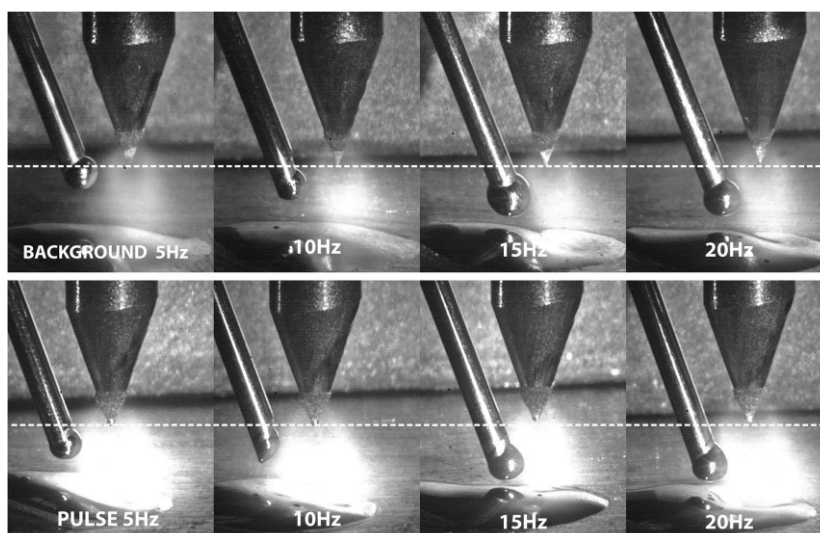


Figura 3.10 - Formação da gota na ponta do arame (quadros do instante imediatamente anterior ao movimento de recuo do arame) com TOPTIG® (PIGOZZO, 2022)

A base para este sistema de controle foi fornecida por Pigozzo et al. (2024b). O trabalho propõe uma abordagem baseada na aquisição da corrente de soldagem (I), da tensão eletrodo-peça (U_{ARC}), da tensão eletrodo-arama (U_{EW}) e da velocidade instantânea de alimentação (W_{FS}), combinada com filmagem em alta velocidade a 2000 fps. A correlação entre U_{EW} e W_{FS} provou ser ferramenta eficaz para identificar com precisão os instantes de estabelecimento e ruptura da ponte metálica, viabilizando a extração de parâmetros intrínsecos ao processo: volume de arame transferido por ciclo, tempo de ponte (*bridging time*), prolongamento da poça, profundidade de inserção do arame na poça (*wire dip*), comprimento de recuo ainda em ponte (*bridge recoil*) e velocidades máxima e média de avanço/recuo. Os autores demonstraram ainda que a U_{EW} varia sensivelmente com a distância eletrodo-arama (D_{EW}) e com a amplitude de oscilação; quanto maior a D_{EW} , mais elevado o nível mínimo de U_{EW} durante o recuo, pois o arame retido em regiões

periféricas do arco permanece em zona mais ionizada (Figura 3.11), o que permite monitorar indiretamente o posicionamento do arame em tempo real.

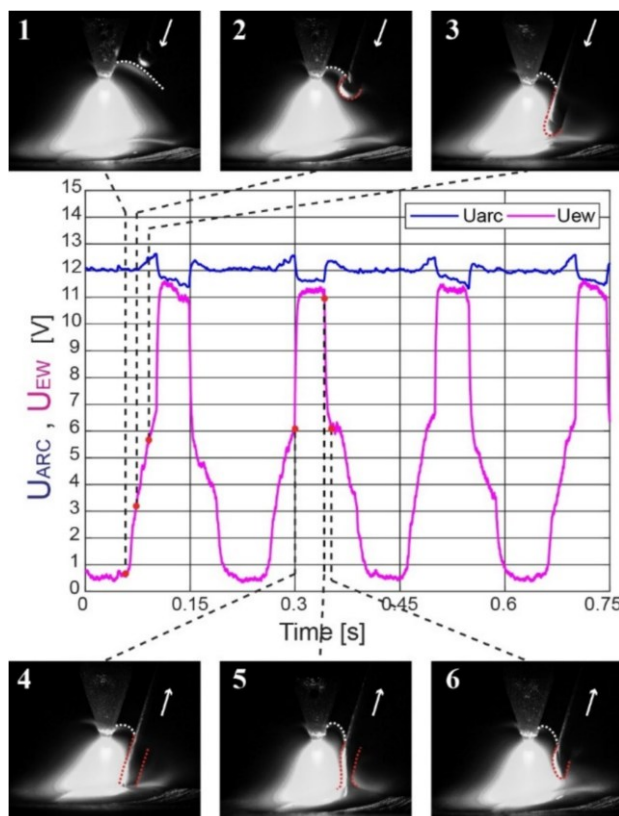


Figura 3.11 - Tensão U_{EW} durante a variação da posição do arame com TOPTIG® (PIGOZZO, 2024b)

No que diz respeito a instabilidades de processo, o mesmo trabalho apresenta, pela primeira vez na literatura, a caracterização detalhada do *wire stubbing* no contexto da alimentação dinâmica. Quando a velocidade de alimentação constante (W_{CS}) é excessiva, o arame colide com o metal solidificado no fundo da poça, sofre flambagem e acumula energia elástica. Ao cessar a colisão e prevalecer a taxa de fusão, essa energia é liberada como pico abrupto de velocidade, detectável diretamente nos sinais de W_{FS} (quadro 5 da Figura 3.12 à esquerda) com velocidade de alimentação do arame medida em aproximadamente 156 m/min (2600 mm/s), suficiente para gerar respingos e distorções geométricas no cordão.

O mesmo trabalho demonstra ainda que, para baixas velocidades de alimentação, o recuo cíclico do arame evita a formação de gotas grosseiras em sua ponta (fenômeno recorrente na alimentação contínua em baixa W_{CS} que, por forças eletromagnéticas e fluxo de plasma, leva à contaminação do eletrodo), ampliando assim a janela operacional estável do processo (Figura 3.13). A metodologia proposta permite, portanto, tanto a parametrização do TIG com alimentação dinâmica em novas condições quanto a detecção em tempo real de instabilidades, condição necessária para a implementação do sistema de sincronismo descrito acima.

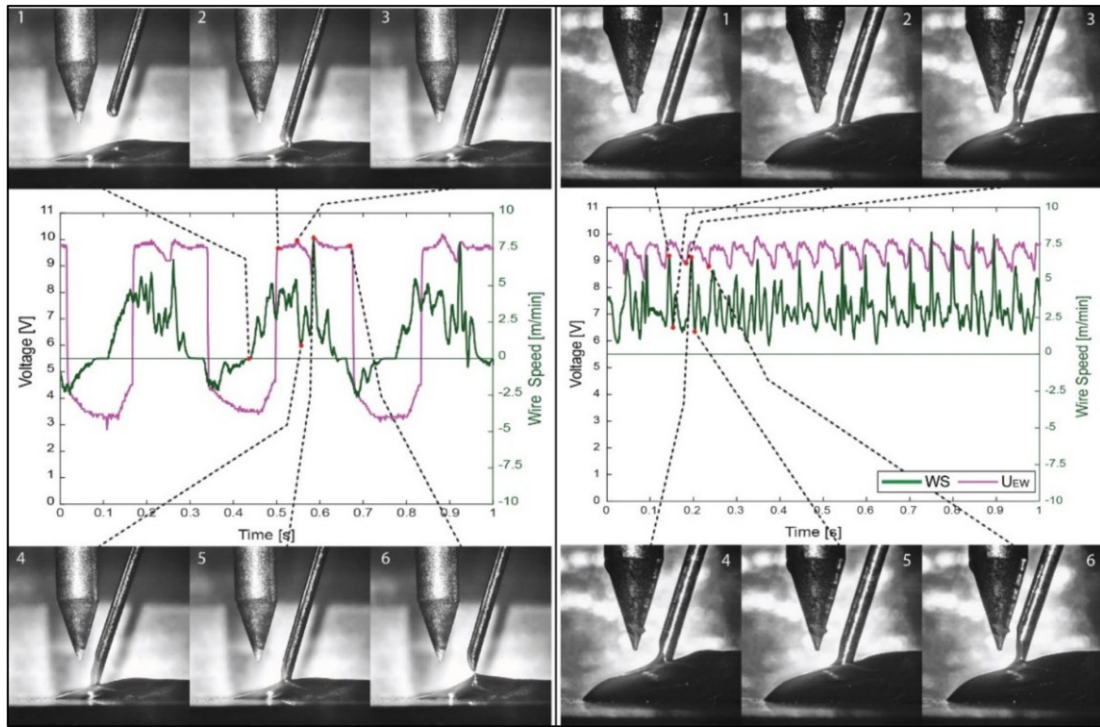


Figura 3.12 - Oscilogramas de U_{EW} e WS com TOPTIG®: (esq.) com alimentação dinâmica e (dir.) com alimentação contínua do arame (PIGOZZO, 2024b)

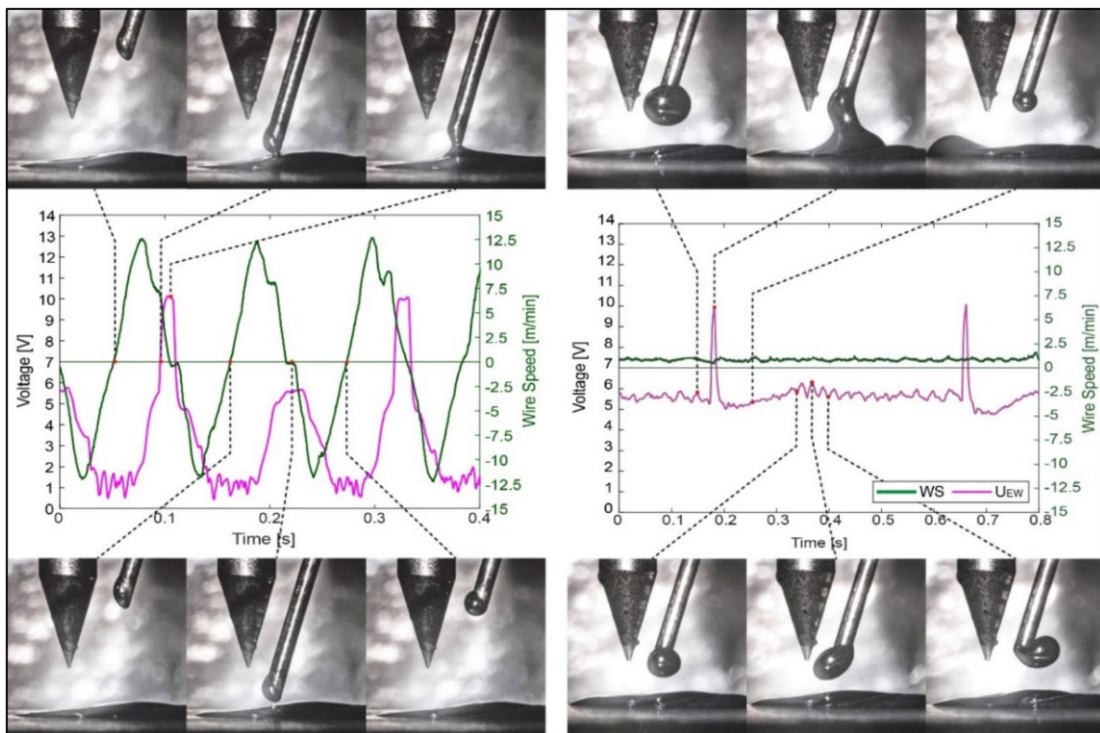


Figura 3.13 - Comparação entre alimentação dinâmica do arame (esq.) e alimentação contínua (dir.) para baixa velocidade de alimentação (0,45 m/min) com TOPTIG® (PIGOZZO, 2024b)

Embora a lógica de sincronismo proposta por Pigozzo et al. (2024b) compartilhe o princípio geral de sincronizar a pulsação da corrente de soldagem com a pulsação do arame de adição, a abordagem adotada nessa tese distingue-se em dois aspectos. O primeiro refere-se ao modo de acionamento da fonte de soldagem: enquanto utilizam o modo MIX da fonte IMC (recurso que

permite o salvamento e a alternância entre múltiplos programas de parâmetros via protocolo serial), o presente trabalho emprega um módulo específico da mesma fonte, capaz de operar em frequências de resposta mais elevadas, o que amplia a faixa operacional disponível para o sincronismo. O segundo aspecto refere-se à configuração geométrica de inserção do arame. Os ensaios de Pigozzo et al. (2024b) foram conduzidos com ângulo de inserção de aproximadamente 20° em relação ao eixo do eletrodo (com TOPTIG® – técnica comercial com bocal de alimentação específico), próximo à posição axial, ao passo que o dispositivo proposto nessa tese é avaliado com ângulos de inserção fora dessa condição (ângulo de alimentação mais próximo ao metal de base e com técnica adaptável a qualquer alimentador convencional). Além disso, o Módulo de Oscilação de Conduíte (MOC), utilizado por Pigozzo et al. (2024b), promove a oscilação do arame por meio do movimento alternado do conduíte, diferentemente do dispositivo empregado nesta tese, no qual a pulsação é produzida pela flexão alternada de uma seção livre do conduíte.

3.5 Patentes sobre mecanismos de pulsação da alimentação de arame

3.5.1 Mecanismos baseados em eletroímãs

Uma quantidade significativa de alimentadores não convencionais para pulsação do arame utiliza eletroímãs como elemento de acionamento. Karpov (1984), por exemplo, propôs um eletroímã com núcleo central móvel contendo pilhas de presilhas (molas de disco) unidirecionais, que agarram e empurram trechos do comprimento do arame que passa concentricamente por elas. O curso de oscilação e, por conseguinte, a amplitude de pulsação do arame, é definido pelo comprimento livre do alojamento do núcleo dentro do eletroímã, sendo o retorno garantido por uma mola apoiada no bocal de saída. A frequência é ditada pela frequência de acionamento da bobina.

Paton (1989) apresentou um sistema com dois eletroímãs e núcleos centrais móveis perfurados montados concentricamente à passagem do arame; o acionamento alternado dos eletroímãs, em conjunto com um mecanismo de agarramento unidirecional, produz o movimento pulsado. Paton (1984), de forma semelhante, utilizou um único eletroímã cujo núcleo é restituído por arruelas elásticas (molas) que conduzem o mecanismo de agarramento e arraste unidirecional do arame. Yurginsk (1995), por sua vez, empregou dois eletroímãs com núcleos perfurados (um móvel e outro fixo) e um terceiro núcleo compartilhado entre eles, separados por amortecedores de borracha; a amplitude de pulsação é regulada manualmente por meio de um parafuso que altera a folga do sistema. Em todas essas invenções, a frequência é selecionada eletricamente pela frequência de acionamento das bobinas, mas a amplitude e a frequência são, de forma geral, intrinsecamente dependentes.

3.5.2 Mecanismos mecânicos (alimentadores não convencionais)

Paton (1987) e Paton (1988) descreveram sistemas mecânicos para alimentação intermitente do arame nos quais uma carcaça envolvente, dotada de guias inclinadas, força os mecanismos de tração a entrar em ação por apertarem pares de roletes tracionadores contra o arame. O movimento de vai e vem das carcaças acopla e desacopla os mecanismos, produzindo impulsionamento e paradas subsequentes do arame.

Paton (1982) utilizou um motor rotativo unidirecional com excêntrico regulável acoplado a uma barra deslizante perfurada, perpendicular ao eixo do motor. A barra possui um mecanismo móvel de agarramento unidirecional que, na metade do giro em que avança, arrasta o arame; na outra metade, recua sobre ele. A frequência é controlada eletronicamente pela velocidade de giro e a amplitude, manualmente, pelo ajuste da excentricidade. Omsk (1987) empregou um rolete tracionador com pista externa frisada em hélices positivas e negativas intercaladas com seções lisas, promovendo avanço, pausa e recuo em um único sentido de rotação. Nesse caso, amplitude, frequência e número de impulsos ficam atrelados à geometria do rolete.

3.5.3 Mecanismos por variação do comprimento da trajetória do arame

Paton (1981) tratou de um disco acionado por motor com eixo de giro paralelo a uma seção livre e deslizante de conduíte elástico, com presilhas autoblocantes nas extremidades. O disco é montado excentricamente ao conduíte, de modo que em uma posição o conduíte fica reto e na posição diametralmente oposta é flexionado. As presilhas atuam alternadamente, conforme a fase do ciclo, para permitir a alimentação do arame em pulsos.

Kiev (1994) também utilizou a variação do comprimento da trajetória percorrida pelo arame: parte do conduíte que guia o arame entre alimentador e tocha é curvada dentro de uma cavidade plana formada por dois apoios, um fixo e outro móvel. Quando o apoio móvel fecha a cavidade, o arame é retificado e impulsionado para a frente (sobrepondo-se à velocidade imposta pelos roletes do alimentador); quando o apoio retorna à posição aberta, o conduíte recupera sua curvatura e o arame recua. Tal invenção foi concebida preferencialmente para MIG/MAG. Gribachev (1991) apresentou um sistema baseado em dois conjuntos de embreagens de roda livre montados dentro do alimentador, sendo o segundo acionado por biela-manivela, para sobrepor avanços intermitentes à rotação contínua dos roletes. Nesse caso, a alimentação resultante é sempre no sentido de avanço, sem recuos.

3.5.4 Mecanismo por vibração longitudinal do conjunto tracionador

Plasch (2016) propõe uma abordagem distinta: o próprio conjunto de roletes tracionadores é montado sobre guias lineares e vibrado alternadamente na direção do comprimento do arame, por

meio de um mecanismo biela-manivela acionado por um motor adicional, tornando-se a base da técnica comercial TIPTIG®. O movimento de vibração é sobreposto ao movimento de alimentação contínua dos roletes, permitindo independência entre os movimentos de alimentação e de pulsação. Todavia, essa invenção não pode ser utilizada com alimentadores convencionais, uma vez que o alimentador é parte integrante do mecanismo.

3.5.5 Síntese crítica das patentes

A análise do conjunto de patentes revisadas evidencia limitações recorrentes que, em última instância, justificam o desenvolvimento proposto nesta tese: (a) dependência de alimentadores ou tochas proprietárias; (b) intrínseco acoplamento entre os parâmetros de frequência e amplitude, dificultando o ajuste independente entre eles; (c) flexibilidade limitada para mudanças rápidas de amplitude; e (d) faixas operacionais geralmente restritas, seja em baixas frequências (mecanismos mecânicos com motor elétrico convencional), seja em um único modo de transferência (curto-circuito, no caso do CMT®). O pulsador de arame desenvolvido nesta tese busca superar essas limitações por meio de um dispositivo externo, modular, adaptável a qualquer alimentador e tocha convencionais, com frequência e amplitude reguladas de forma independente e operação em ampla faixa de frequências.

3.6 Lacunas na literatura e posicionamento da presente tese

A revisão realizada permite delinear o estado do conhecimento e as lacunas que motivam a presente tese. Do ponto de vista da produção científica, a alimentação pulsada de arame é uma técnica cujas origens remontam à década de 1980, mas cuja consolidação acadêmica é relativamente recente: durante muito tempo, o tema foi tratado predominantemente por meio de patentes e relatórios técnicos de fabricantes, com escassa avaliação experimental independente em periódicos revisados por pares. Publicações mais recentes vêm consolidando a técnica como abordagem consistente nos processos TIG, MIG/MAG e Plasma, abrangendo desde soldagem orbital de dutos até manufatura aditiva a arco elétrico. Ainda assim, importantes lacunas permanecem abertas.

No plano tecnológico, a maioria dos sistemas disponíveis impõe ao usuário a aquisição de alimentadores ou tochas proprietárias, restringindo a adoção industrial e impedindo a integração da técnica a equipamentos já instalados. Além disso, os mecanismos existentes raramente viabilizam o ajuste independente entre frequência e amplitude de pulsação, o que limita a flexibilidade operacional e dificulta a parametrização sistemática do processo. Esses parâmetros, como demonstrado ao longo desta revisão, exercem efeitos distintos, por exemplo, sobre a transferência metálica, o aporte térmico e a geometria do cordão.

Por fim, Pigozzo et al. (2022) demonstraram que a simples igualdade entre as frequências comandadas de alimentação e de corrente não garante o sincronismo físico da transferência metálica, sinalizando a necessidade de uma malha de controle ativa capaz de detectar os eventos de estabelecimento e ruptura da ponte metálica entre arame e poça de fusão em tempo real. Pigozzo et al. (2024b) forneceram a base instrumental para essa malha ao demonstrar que a tensão eletrodo-arama (U_{EW}), correlacionada à velocidade instantânea de alimentação, permite identificar esses eventos e diagnosticar instabilidades como o *wire stubbing*. No entanto, a implementação prática de um sistema de controle em malha fechada que utilize esses sinais para modular a corrente ou a velocidade de alimentação de forma robusta, em tempo real e compatível com diferentes configurações de processo, permanece como lacuna em aberto.

Diante dessas lacunas, a presente tese propõe o desenvolvimento de um pulsador de arame externo, de tecnologia nacional, modular e de baixo custo, concebido para ser acoplado a qualquer alimentador e tocha convencionais. O dispositivo foi projetado para operar nos processos TIG (foco do trabalho) e MIG/MAG (neste último como segundo arame), com frequência e amplitude de pulsação reguláveis de forma independente, com possibilidade de sincronismo entre a pulsação da alimentação do arame de adição e a pulsação da corrente de soldagem. Ao tentar superar simultaneamente as restrições de dependência de equipamentos proprietários, de acoplamento entre frequência e amplitude, e de ausência de malha de controle de sincronismo, o presente trabalho busca explorar de forma integrada possibilidades de avanços relevantes relacionados à pulsação da alimentação de arame com o processo TIG.

3.7 Quadro-resumo dos parâmetros extraídos da literatura

A diversidade de configurações experimentais empregadas nos trabalhos revisados (que variam em termos de processo de soldagem, material de adição, faixa de frequência de pulsação do arame/corrente, nível de corrente de soldagem, ângulo de inserção do arame e condições cinemáticas) dificulta a comparação direta entre estudos e a extrapolação de resultados para novas condições operacionais. Com o objetivo de sistematizar essas informações e se ter uma base de referência para a definição metodológica e experimental da presente tese, a Tabela 3.1 reúne os principais parâmetros operacionais extraídos de alguns dos artigos analisados. Os parâmetros de soldagem foram organizados em colunas com as unidades uniformizadas segundo as convenções usuais na literatura de soldagem: ângulo de inserção do arame em relação ao substrato ($^{\circ}$), corrente de soldagem (A), frequência de pulsação (Hz), amplitude de oscilação (mm), velocidade de soldagem (cm/min) e velocidade de alimentação do arame (m/min).

Tabela 3.1 - Síntese dos principais parâmetros de processo/técnica utilizados em trabalhos sobre pulsação da alimentação do arame de adição (Onde: HW – alimentação de arame quente (Hot Wire); CW – alimentação de arame frio (Cold Wire); n/e – informação não especificada pelo autor)

Referência	Processo	Arame / Substrato	Ângulo arame (°)	Corrente de Sold. (A)	Freq. pulsação (Hz)	Amp. de Pulsação (mm)	Vel. de soldagem (cm/min)	Vel. alim. arame (m/min)
Dornelles (2022)	Plasma (MADA)	ER 309L (1,2 mm) / ASTM A36	30	180	0; 3; 6; 9; 12; 15	5	15,0	1,70
Cunha et al. (2022)	TIG (TIP-TIG®)	ER 70S-6 (1,0 mm) / AISI 1012	20	150	2; 10; 18	2; 5; 8	15,0	0,50 (TI) 1,50 (UB) 2,20 (BW)
Jorge et al. (2018)	TIG	ER 308LSi (1,2 mm) / Aço Carbono	45	160	15	8	20,0	0,70
Pigozzo et al. (2022)	TIG (TOPTIG®)	ER 70S-6 (1,0 mm) / SAE 1020	70	200 (lp) / 120 (lb) 160 (média)	5; 10; 15; 20	n/e	30,0	2,30
Pigozzo et al. (2024a)	TIG (TIPTIG®) (Revestimento)	Inconel 625 (1,0 mm) / ASTM A36	40	170 (CW) 70 (HW)	18	n/e	13,2	1,50
Pigozzo et al. (2024b)	TIG	ER 309LSi (1,0 mm) / ASTM A36	70	180	Variável (até 15)	5; 8; 10	n/e	2,80
Riffel et al. (2020)	TIG (Revestimento)	Inconel 625 (1,0 mm) / ASTM A36	30	200 e 250	0; 5; 18	5	7,5	1,80
Santangelo et al. (2018)	TIG (TIP-TIG®)	ER 70S-6 (0,9 mm) / 1018	45	150 (CW) / 70 (HW)	16	n/e	24,0	1,59
Silva et al. (2018)	TIG (IMC WTS®)	ER 70S-6 (1,2 mm) / SAE 1020	20	200 A	0; 1; 2	n/e	15,0	0,50
Silva et al. (2019a)	TIG (Orbital)	ER 70S-6 (1,2 mm) / ASTM A139	n/e	469 (lp) / 153 (lb)	1,25	n/e	27,8 (média)	0,34
Silva et al. (2019b)	TIG (Multiposição)	Inconel 625 (1,0 mm) / ASTM A36	30	190 (lp) / 150 (lb) 176 (média)	20	n/e	7,5	1,40

CAPÍTULO IV

DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DO DISPOSITIVO DE PULSAÇÃO DA ALIMENTAÇÃO DE ARAME

Este capítulo descreve a concepção, o projeto, a construção e a avaliação funcional do dispositivo pulsador da alimentação de arame, que constitui uma das principais contribuições desta tese. Como diferencial principal, tal dispositivo foi concebido para promover a pulsação da alimentação do arame de adição por meio da flexão alternada de uma seção livre do conduíte posicionado entre o alimentador e a tocha, portanto, externamente a ambos os equipamentos, o que confere portabilidade e adaptabilidade a sistemas de soldagem já instalados e convencionais.

4.1 Princípio de Funcionamento

O princípio de funcionamento do dispositivo pulsador baseia-se na variação controlada do comprimento de parte da trajetória percorrida pelo arame de adição entre o alimentador e a tocha. A Figura 4.1 ilustra esquematicamente os quatro momentos-chave que caracterizam a atuação do dispositivo sobre o arame que chega empurrado continuamente a partir do alimentador, convertendo-o, na saída, em um arame com alimentação pulsada com alcance desse movimento alternado até o ponto de adição no arco/poça de fusão.

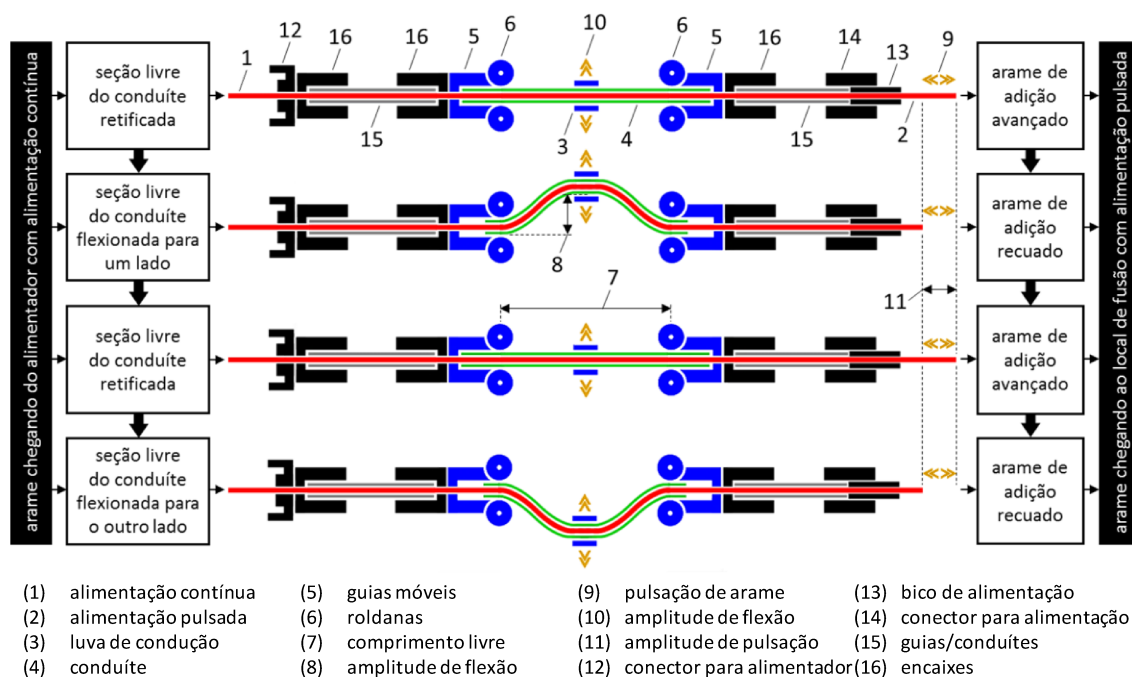


Figura 4.1 - Esquema de funcionamento do dispositivo pulsador de alimentação de arame – representação dos quatro momentos-chave do ciclo de pulsação (adaptado da patente).

No primeiro momento, com a luva de condução na posição intermediária, a seção livre do conduíte delimitada pelas guias móveis e, conseqüentemente, o arame conduzido concentricamente a essa seção, encontra-se retificada (reta). Nessa condição, a alimentação de material chega ao local de fusão com a ponta do arame em posição de avanço.

No segundo momento, com a luva de condução deslocada para um dos lados, a seção livre do conduíte é curvada até a amplitude de flexão previamente selecionada. O arame, guiado concentricamente ao conduíte, passa a percorrer uma trajetória estendida, maior que o comprimento livre nominal; como o arame é livre para deslizar dentro do conduíte, o que se observa fisicamente é um aumento momentâneo do comprimento da trajetória a ser percorrida. Para uma velocidade de alimentação contínua selecionada no alimentador, isso se traduz, momentaneamente, em menor quantidade de arame chegando ao local de fusão, ou seja, a ponta do arame realiza um recuo.

No terceiro momento, a luva de condução retorna à posição intermediária e a seção livre do conduíte é novamente levada para a posição retificada (reta), restabelecendo a trajetória original do arame. Há, portanto, um avanço momentâneo do arame em direção ao local de fusão. No quarto momento, a luva se desloca para o lado oposto ao do segundo momento, flexionando a seção livre do conduíte na direção contrária e produzindo novo recuo do arame.

Entre o alimentador e o dispositivo pulsador há, pelo próprio sistema tracionador do alimentador, restrição a qualquer movimento contrário ou a favor da alimentação contínua. Por esse motivo, depois de passar pelo pulsador, o arame assume um movimento de alimentação pulsada composto pela superposição dos movimentos de avanço e recuo cíclicos ao movimento contínuo imposto pelo alimentador. Globalmente, a quantidade de arame que chega ao local de deposição por unidade de tempo (taxa de deposição) não é alterada e permanece equivalente à velocidade de alimentação selecionada no alimentador, dado o diâmetro do arame. As velocidades locais de entrada e saída do arame variam (diminuem no recuo e aumentam no avanço de forma momentânea), mas, em média, suas contribuições se anulam. Assim, entre pulsos de avanço e pulsos de recuo não ocorre parada da alimentação, diferentemente do que se observa em outros mecanismos que também trabalham com alimentação pulsada.

Com técnica concebida, destaca-se que os movimentos de alimentação (determinado pela velocidade contínua selecionada no alimentador convencional) e de pulsação (determinado pela frequência e pela amplitude de flexão da seção livre do conduíte selecionadas no dispositivo) são independentes e podem ser controlados separadamente. Adicionalmente, a frequência do ciclo de pulsação da alimentação de arame corresponde ao dobro da frequência do movimento alternativo da luva de condução, pois, a cada volta do disco, a luva passa duas vezes por cada uma das posições opostas de imposição de curvatura ao arame no comprimento livre do conduíte. A amplitude de pulsação é diretamente proporcional à amplitude de flexão selecionada pela posição da luva, podendo ainda ser refinada pelo comprimento livre do conduíte: quanto maior o comprimento livre, menor a amplitude de pulsação.

4.2 Descrição do Protótipo

Na Figura 4.2 apresenta-se o dispositivo pulsador como construído. Durante a montagem desse protótipo foram feitos ajustes em relação ao esquema conceitual (como demonstrado anteriormente por Jorge et al. (2018), em uma versão mais rudimentar), notadamente a substituição das roldanas por guias fixas, que delimitam a trajetória do conduíte entre a luva de condução e as guias móveis para conferir maior robustez (menos folgas). Foram ainda utilizados conectores do tipo engate rápido na entrada (conexão com o alimentador) e na saída do pulsador (conexão com o conduíte que leva o arame à tocha ou ao bico de alimentação), de modo a garantir compatibilidade com equipamentos convencionais utilizados para os processos TIG e MIG/MAG.

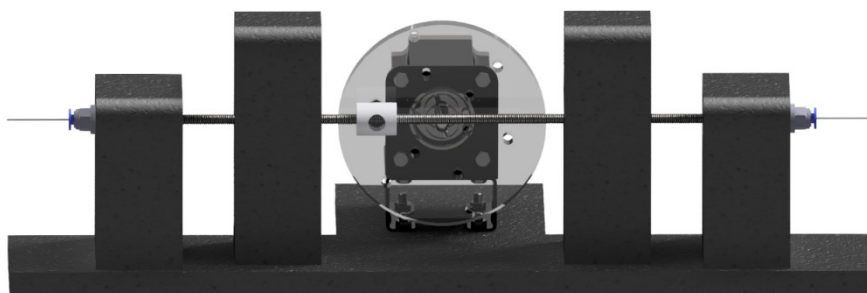


Figura 4.2 - Dispositivo pulsador de alimentação de arame como construído

Com essas características construtivas, objetivou-se reproduzir condições operacionais e produtivas comparáveis às obtidas por sistemas com pulsação integrada à tocha, mas utilizando-se de tochas e alimentadores convencionais. Dessa forma, a técnica de pulsação da alimentação de arame pode ser aplicada em diferentes processos de deposição por fusão (na presente tese com foco em arco elétrico, mas também para processos a laser, por exemplo), sem demandar modificações significativas ou a substituição dos equipamentos já existentes.

4.3 Desenvolvimento do Hardware

4.3.1 Motor de acionamento e driver

A escolha do motor de acionamento foi baseada na necessidade de alcançar altas frequências de pulsação, associadas a um controle preciso da velocidade de rotação. Optou-se por um servo motor (conjunto motor de passo com *encoder*) modelo Easy Servo NEO-ES-M32320, da fabricante Leadshine®, com torque máximo de 2,0 Nm e padrão mecânico NEMA 23, apresentado na Figura 4.3 (à esquerda). Essa opção permitiu atingir velocidades angulares superiores às de um motor de passo convencional (alternativa de menor custo) ao mesmo tempo em que, por operar em malha fechada, proporcionou melhor desempenho em resposta às variações de referência de velocidade, reduzindo erros na saída e, conseqüentemente, na frequência de pulsação do movimento do arame.

O driver de acionamento utilizado, modelo ES-D508, também fabricado pela Leadshine®, é apresentado na Figura 4.3 (à direita). A alimentação do driver foi realizada por meio de uma fonte chaveada de 48 V e 500 W.



Figura 4.3 - (Esq.) Motor Easy Servo NEO-ES-M32320
(Dir.) Driver ES-D508, fabricante Leadshine®

4.3.2 Plataforma de controle

Para controlar o driver do servo motor adotou-se a plataforma Arduino UNO em conjunto com um módulo gerador de sinal PWM (1 a 150 kHz) com comunicação serial. O módulo é responsável por gerar o sinal de pulso que define a referência de velocidade do driver. Os demais comandos (sinal de direção e habilitação) são gerados diretamente pelo microcontrolador. O sistema ainda monitora os sinais de alarme do driver, ativados em caso de sobretensão, sobrecorrente ou erro de posição do servo motor. O esquema de controle do servo motor é apresentado na Figura 4.4.

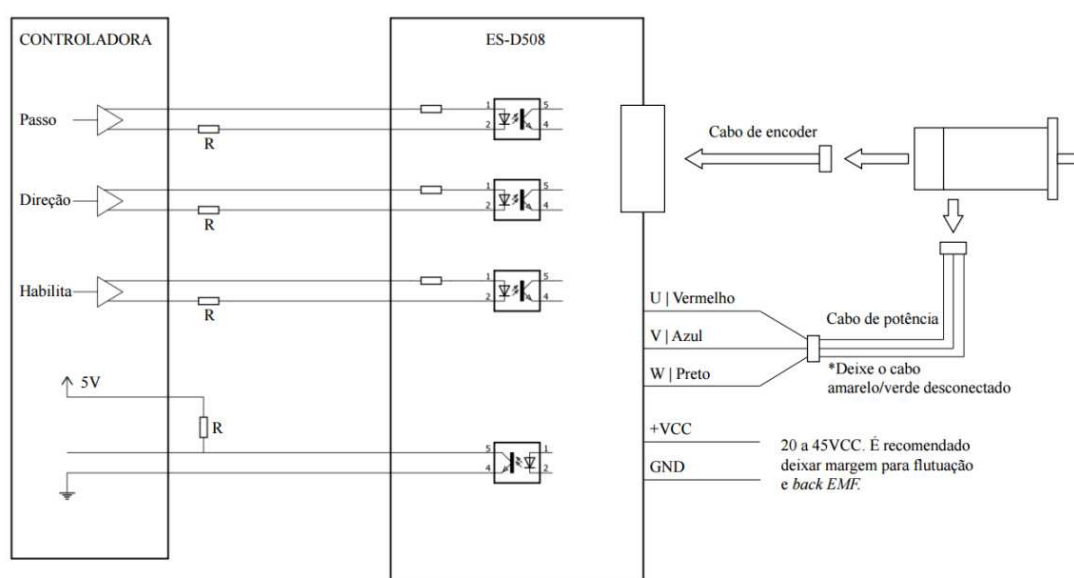


Figura 4.4 - Esquema de controle do servo motor do dispositivo pulsador de arame

4.3.3 Placa de condicionamento de sinais

Outra parte integrante do escopo deste trabalho é o monitoramento dos sinais provenientes da fonte de soldagem que são importantes para o processo de deposição em si, a saber: corrente de soldagem, tensão do arco e tensão eletrodo-arama. Para tal, foram utilizadas duas placas de condicionamento de sinais, apresentadas na Figura 4.5, desenvolvidas pelo Núcleo de Pesquisa em Eletrônica de Potência da Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia.

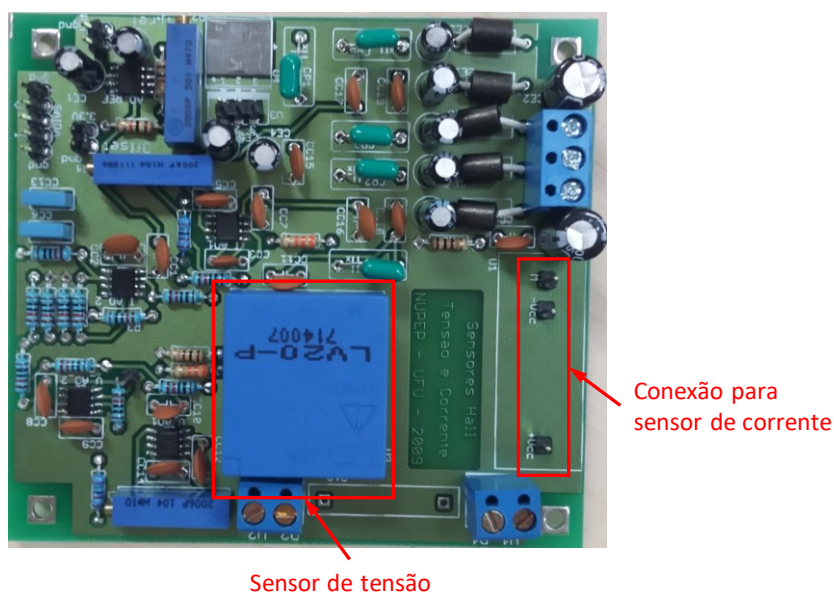


Figura 4.5 - Placa de condicionamento de sinais adaptada para monitoramento da corrente de soldagem, tensão do arco e tensão eletrodo-arama

A utilização de duas placas foi necessária em função da necessidade de aquisição simultânea de dois sinais de tensão (tensão do arco e tensão eletrodo-arama) e um sinal de corrente (corrente de soldagem). As placas originais foram adaptadas para os níveis de sinal característicos dos processos de soldagem. Para a medição de tensão, empregou-se o sensor LV 20-P, com faixa de leitura AC/DC de até 500 V, enquanto para a medição de corrente foi utilizado o sensor HTA 600-S, com faixa de leitura de ± 1000 A. Adicionalmente, as placas possuem funções de isolamento, filtragem e adequação dos níveis dos sinais para compatibilização com as entradas da placa de aquisição de dados.

4.4 Avaliação de Desempenho do Dispositivo Pulsador

Após a finalização da montagem do dispositivo pulsador, foram conduzidos ensaios de caracterização visando verificar seu correto funcionamento, por meio da medição da amplitude de pulsação imposta ao arame e da frequência efetivamente produzida a este movimento alternado. A bancada experimental utilizada nessa etapa é apresentada na Figura 4.6.



Figura 4.6 - Bancada experimental utilizada nos ensaios de avaliação do dispositivo pulsador de arame

Os ensaios de caracterização do dispositivo foram conduzidos com o objetivo de investigar a influência da amplitude e da frequência de pulsação impostas sobre o movimento efetivamente transmitido ao arame na saída do conduíte, isto é, na região imediatamente anterior ao ponto de fusão. A avaliação contemplou diferentes materiais e diâmetros de arame, buscando identificar possíveis efeitos da rigidez e das características mecânicas de condições variadas sobre a resposta dinâmica do sistema.

Para a aquisição das imagens, utilizou-se uma câmera digital de alta velocidade Hi-Dcam II, da fabricante NAC, configurada para taxas de aquisição de 60, 125, 250 e 500 quadros por segundo, correspondentes às frequências de pulsação F1 (1 Hz), F2 (5 Hz), F3 (15 Hz) e F4 (25 Hz), respectivamente. As imagens, registradas em formato JPG, resolução de 512×384 pixels e em cores, foram obtidas em duas regiões distintas do sistema: na extremidade/ponto do arame, para avaliação do deslocamento efetivamente transmitido, e no disco do mecanismo de pulsação para verificação da velocidade de rotação do conjunto e caracterização do movimento imposto ao conduíte.

Nos ensaios realizados, a amplitude de pulsação foi ajustada por meio da variação da posição da luva de condução em relação ao eixo de rotação do motor, sendo efetuada pela seleção dos diferentes furos presentes no disco de acrílico acoplado ao eixo, conforme ilustrado na Figura 4.7. Os furos foram distribuídos simetricamente em relação ao centro do disco, possibilitando, quando necessário, a utilização de contrapesos para balanceamento do conjunto rotativo e minimizar vibrações.

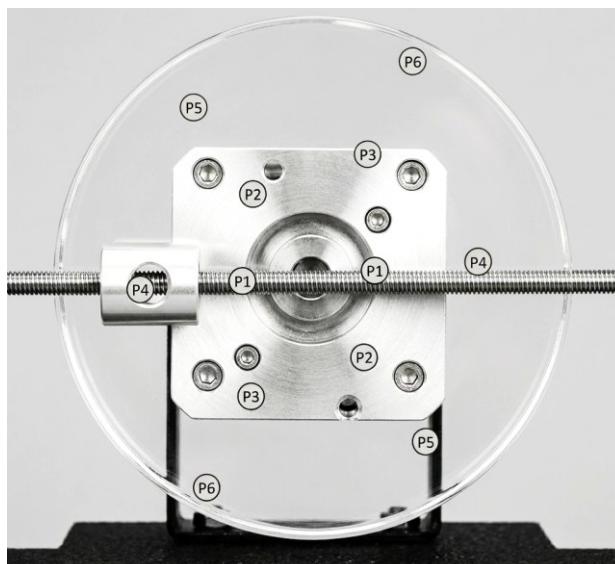


Figura 4.7 - Posição dos furos (P1 a P6) no disco de acrílico acoplado ao eixo do motor para ajuste da amplitude de pulsação.

Para os testes de caracterização, a luva de condução foi posicionada nos furos P2, P3, P4 e P5, não sendo utilizados os furos extremos (P1 e P6). Adicionalmente, visando ampliar a faixa de amplitudes avaliadas, variou-se o comprimento livre do conduíte entre as guias móveis, adotando-se as distâncias de 26 cm e 30 cm. Dessa forma, foi possível investigar a influência conjunta da excentricidade do mecanismo e da flexibilidade do conduíte sobre a amplitude de pulsação efetivamente transmitida ao arame.

As imagens obtidas foram analisadas utilizando o software ImageJ®, após calibração realizada com base na escala de referência empregada durante os ensaios. Para cada condição experimental, foram selecionados cinco ciclos de pulsação para análise, sendo estes distribuídos de forma alternada ao longo da sequência de imagens. Esse procedimento teve como objetivo reduzir a influência de eventuais variações transitórias no movimento do arame e assegurar a avaliação de ciclos gerados por ambos os lados do disco excêntrico.

Em cada ciclo, foram identificadas as posições correspondentes aos extremos de recuo e avanço do arame, registrando-se a respectiva posição horizontal e o número do quadro associado. A amplitude de pulsação foi determinada pela diferença entre as posições extremas de avanço e recuo observadas em cada ciclo. Já a frequência de pulsação foi calculada a partir do intervalo de quadros correspondente a um ciclo completo de movimento, considerando-se para isso a taxa de aquisição previamente configurada na câmera de alta velocidade.

4.5 Resultados de Amplitude e Frequência de Pulsação

Os resultados obtidos nos 25 ensaios realizados são apresentados na Tabela 4.1, organizada por material e diâmetro de arame e, dentro de cada bloco, pela combinação de posição da luva (P_n) e frequência (F_n). São apresentadas, para cada teste, a amplitude média e a frequência média, com seus respectivos desvios-padrão.

Tabela 4.1 - Medições dos testes para avaliação do pulsador de arame (legenda: P2-P5 = posições da luva; F1, F2, F3 e F4 = 1, 5, 15 e 25 Hz; e L = comprimento livre do conduíte)

Teste	Amplitude média (mm)	Desvio-padrão (mm)	Frequência média (Hz)	Desvio-padrão (Hz)
Arame - ER70S-6 Ø 1,0 mm L = 26 cm				
P2 F1	2,58	0,18	1,00	0,03
P2 F2	2,55	0,19	5,13	0,18
P2 F3	2,49	0,15	16,28	0,99
P2 F4	2,95	0,15	25,32	1,47
P3 F1	5,84	0,20	1,01	0,03
P3 F2	5,58	0,37	5,24	0,43
P3 F4	6,43	0,25	25,79	0,72
P4 F1	9,64	0,26	1,05	0,07
P4 F2	9,57	0,22	5,21	0,00
P4 F3	9,88	0,18	16,07	1,00
P4 F4	10,32	0,06	26,17	2,09
P5 F1	15,08	0,23	1,13	0,04
P5 F2	15,00	0,25	6,02	0,31
P5 F3	14,80	0,38	14,93	0,95
P5 F4	15,77	9,61	24,33	1,37
Arame - ER70S-6 Ø 1,0 mm L = 30 cm				
P4 F3	7,07	2,78	14,24	0,78
P5 F1	12,27	0,16	1,09	0,10
P5 F2	12,15	0,53	5,70	0,35
P5 F3	10,52	0,73	13,00	1,38
Arame - ER4043 (alumínio) Ø 1,0 mm L = 26 cm				
P2 F2	2,29	0,11	4,04	0,25
P2 F3	2,41	0,15	16,78	0,26
P3 F2	5,23	0,07	5,42	0,49
P3 F3	5,25	0,33	16,32	1,39
P3 F4	5,18	0,61	24,76	0,53
P4 F2	9,39	0,12	5,25	0,10
P4 F3	8,87	0,30	15,01	0,83
Arame - ER70S-6 Ø 1,2 mm L = 26 cm				
P2 F2	2,85	0,11	5,07	0,41
P2 F3	2,95	0,19	15,98	1,05
P3 F2	5,87	0,14	4,96	0,17
P3 F3	5,79	0,45	15,56	0,75
P3 F4	5,99	0,10	26,90	0,80
P4 F2	9,82	0,35	5,08	0,11
P4 F3	9,90	0,15	16,69	0,71
P5 F4	14,61	0,68	25,00	0,00

A partir desses ensaios, buscou-se estabelecer o envelope operacional do dispositivo, identificando as combinações de amplitude e frequência capazes de produzir respostas estáveis e repetíveis na extremidade do arame. Observa-se, por exemplo, que, para a condição envolvendo o arame ER70S-6 de 1,0 mm e comprimento livre do conduíte de 26 cm, a combinação P5-F4 apresentou elevado desvio-padrão da amplitude de pulsação (9,61 mm), evidenciando uma redução da repetibilidade do movimento transmitido ao arame. Esse comportamento sugere a existência de limitações dinâmicas/geométricas do sistema quando são combinadas simultaneamente as maiores amplitudes e as maiores frequências de pulsação.

Observa-se, na Figura 4.8, que os valores experimentais de amplitude foram inferiores aos valores estimados analiticamente, essa diferença decorre das simplificações adotadas no modelo analítico, que considera que o conduíte, ao ser flexionado, descreve uma trajetória reta (e não uma curva) o que subestima o recuo real. Soma-se a isso o efeito de possíveis folgas entre o arame e o conduíte, que amplificam a amplitude efetivamente entregue.

A observação dos desvios-padrão na Figura 4.8 indica que a variação da amplitude de pulsação dentro de uma mesma posição da luva (considerando as diferentes frequências ensaiadas) é pequena. Há, contudo, leve tendência de aumento da amplitude com a frequência, fenômeno ilustrado na Figura 4.10 para a posição P4, que se repete para as demais posições da luva.

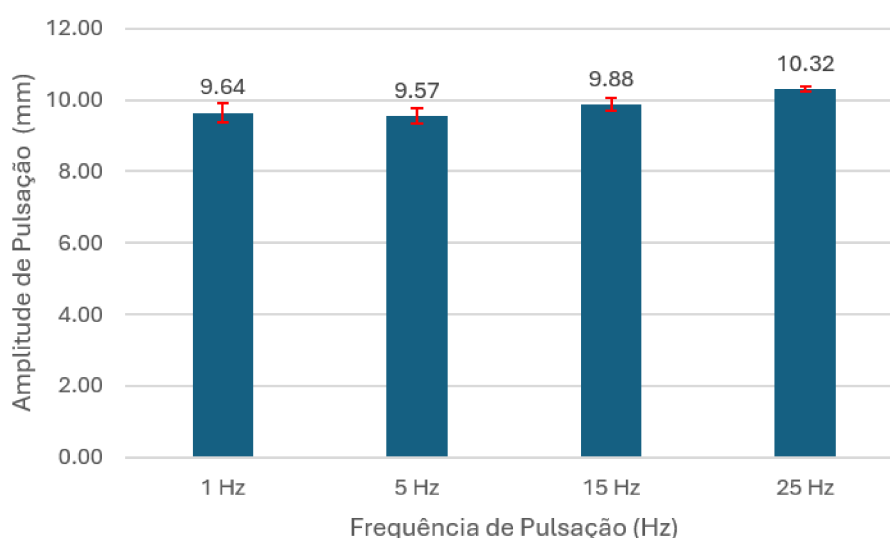


Figura 4.10 - Amplitudes médias de pulsação para a posição P4 da luva em função da frequência

A análise das filmagens do disco do pulsador sugere que, em velocidades mais elevadas, a luva de condução impulsiona o arame por um efeito de chicoteamento do conduíte, que deixa de seguir exatamente a trajetória esperada. Tal efeito pode ser observado a partir do quadro 14 da Figura 4.11. Com o aumento da frequência de pulsação, o chicoteamento pode gerar deformações do conduíte em pontos distintos daquele causado pela movimentação da luva, criando flexões secundárias que também afetam o deslocamento do arame e, conseqüentemente, a amplitude de pulsação.

A correlação entre o movimento do disco e o movimento da ponta do arame é apresentada na Figura 4.12, que ilustra o efeito da flexão da seção livre do conduíte sobre a posição do arame. Observa-se que, nos pontos A e C, o conduíte não se encontra flexionado e o arame se encontra em posição de avanço; já nos pontos B e D, o conduíte é flexionado pela movimentação da luva em posições opostas e o arame recua.

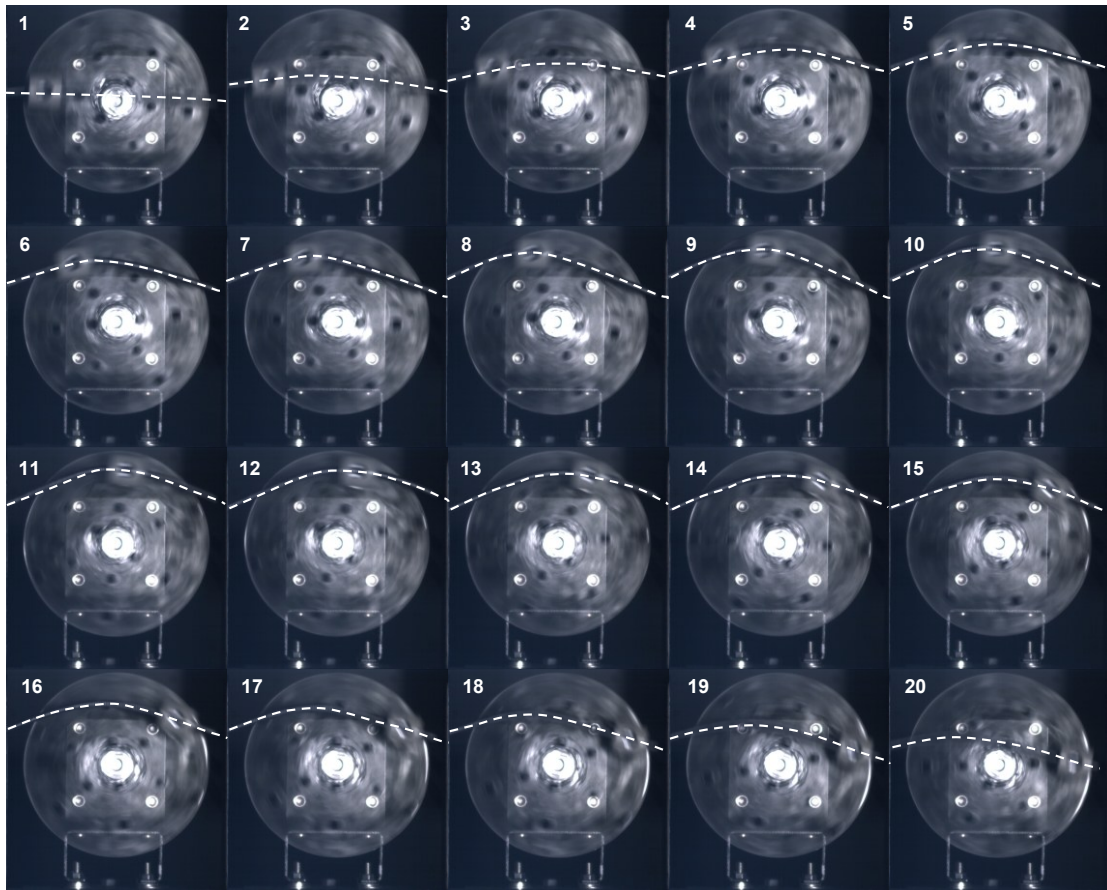


Figura 4.11 - Sequência de imagens mostrando o movimento de chicoteamento do conduíte observado na condição P5-F4 (rotação horária)

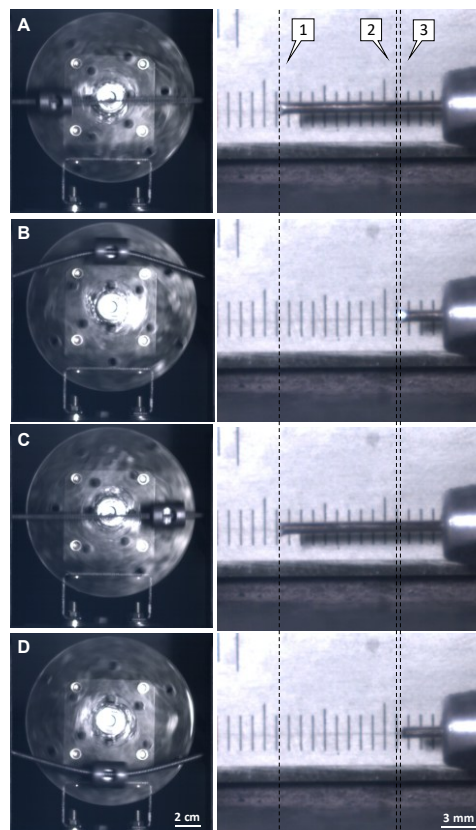


Figura 4.12 - Correlação entre o movimento do disco e o movimento da ponta do arame ao longo de um ciclo de pulsação (rotação horária)

Ainda na Figura 4.12, observa-se uma pequena diferença entre as amplitudes associadas aos dois movimentos de recuo do arame, evidenciada pela distância entre as linhas tracejadas 2 e 3. Esse comportamento é atribuído a um leve desalinhamento entre o centro de rotação do disco excêntrico e o ponto de apoio do conduíte nas guias móveis, o que resulta em níveis de flexão ligeiramente distintos quando a flexão é produzida pelo semidisco superior (quadro B) ou pelo semidisco inferior (quadro D). Embora perceptível nas imagens, essa assimetria apresentou baixa magnitude, não ultrapassando 0,5 mm nos ensaios realizados, sendo considerada pouco significativa frente às amplitudes de pulsação avaliadas.

Com o objetivo de avaliar a influência do comprimento livre do conduíte sobre a amplitude de pulsação transmitida ao arame, foram realizados ensaios mantendo-se a luva de condução na posição P5 e variando-se a distância entre as guias móveis para 26 cm e 30 cm. Nessas condições, foram obtidas amplitudes médias de 14,96 mm e 11,65 mm, respectivamente, evidenciando uma redução da amplitude transmitida com o aumento do comprimento livre do conduíte. Dessa forma, confirma-se que a variação da distância entre as guias móveis constitui um recurso para o ajuste complementar da amplitude de pulsação, ampliando a faixa operacional do dispositivo sem a necessidade de alterações no disco excêntrico.

A comparação entre diâmetros de arame do mesmo material (aço carbono ER70S-6, de 1,0 mm e 1,2 mm de diâmetro) não revelou mudanças significativas na amplitude de pulsação, conforme ilustrado na Figura 4.13. Já a comparação entre materiais (aço carbono e alumínio ER4043), ambos com 1,0 mm de diâmetro, indicou amplitude ligeiramente inferior para o arame de alumínio, como apresentado na Figura 4.14. Esse comportamento pode ser atribuído à menor rigidez mecânica e à maior ductilidade do arame de alumínio, características que favorecem a ocorrência de deformações (permanentes ou não) e dificultam seu retorno completo à configuração original após sucessivos ciclos de flexão. Ainda assim, os resultados demonstram que o arame de alumínio pode ser pulsado pelo dispositivo desenvolvido sem maiores problemas.

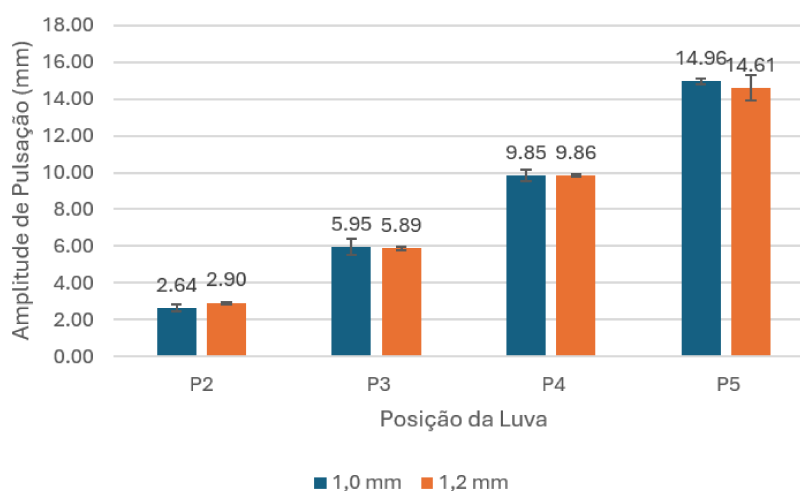


Figura 4.13 - Amplitudes de pulsação para diferentes diâmetros de arame ($\varnothing$ 1,0 e 1,2 mm)

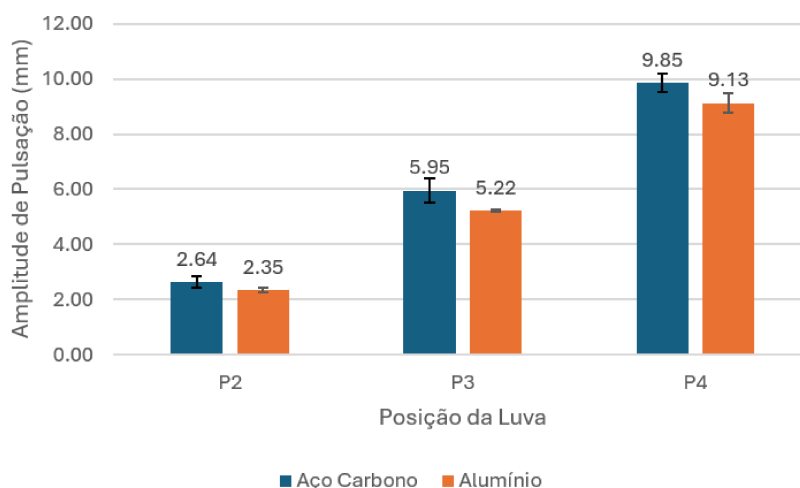


Figura 4.14 - Amplitudes de pulsação para diferentes materiais de arame (ER70S-6 e ER4043)

4.5.2 Frequência de pulsação

Utilizando-se a mesma metodologia de análise das filmagens descrita anteriormente, determinou-se a frequência de pulsação efetivamente transmitida ao arame para as posições P2 a P5 da luva de condução e para as frequências de referência F1 a F4, estabelecidas por meio do ajuste da velocidade de rotação do servomotor.

Para a determinação da frequência de pulsação, foram identificados nas filmagens os quadros correspondentes aos instantes de máximo avanço e máximo recuo do arame. Conhecida a taxa de aquisição da câmera, calculou-se o intervalo de tempo associado ao deslocamento entre essas duas posições extremas. Considerou-se como período de pulsação o dobro desse intervalo, uma vez que o tempo medido corresponde a apenas meia oscilação do movimento (avanço ou recuo). A frequência de pulsação foi então obtida como o inverso do período calculado.

A Figura 4.15 apresenta os valores médios de frequência obtidos para o arame ER70S-6 de 1,0 mm de diâmetro e comprimento livre de 26 cm.

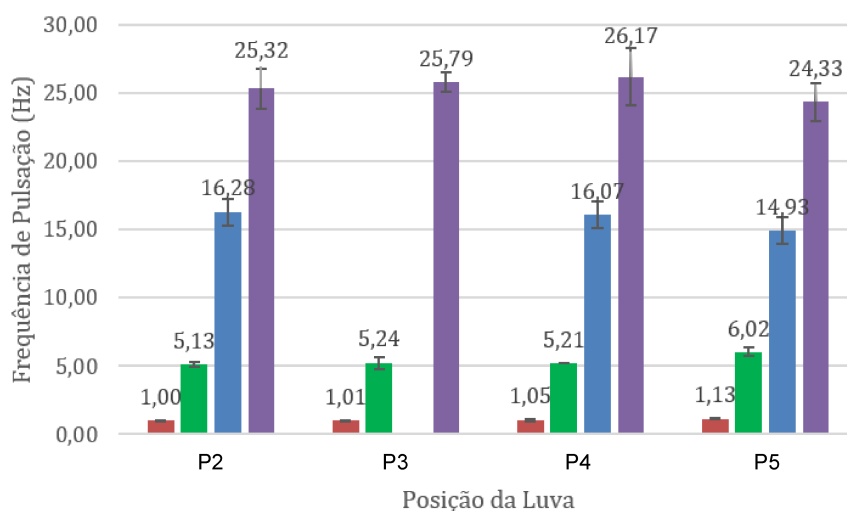


Figura 4.15 - Frequência média de pulsação do arame para as diferentes posições da luva de condução (Nota: na condição P3-F3 ocorreu uma falha no armazenamento das imagens durante a aquisição dos dados, impossibilitando a coleta e a análise dessa condição experimental)

A análise da Figura 4.15 mostra que as frequências de pulsação medidas apresentaram boa concordância com os valores de referência adotados nos ensaios (1, 5, 15 e 25 Hz). Observa-se, entretanto, um aumento gradual do desvio-padrão à medida que a frequência de pulsação é elevada, comportamento possivelmente associado ao efeito de chicoteamento do conduíte, cuja intensidade tende a aumentar em velocidades mais elevadas de rotações do servomotor. Ainda assim, as diferenças observadas foram pequenas, demonstrando a capacidade do sistema em reproduzir com precisão as frequências programadas e validando o correto funcionamento do controle de frequência de pulsação.

A concepção do dispositivo, baseada na flexão periódica da seção livre do conduíte, permite atingir frequências elevadas de pulsação do arame sem exigir velocidades excessivas do motor de acionamento. Isso ocorre porque, durante uma volta completa do disco excêntrico, a luva de condução impõe duas mudanças de sentido ao movimento do conduíte, fazendo com que a extremidade do arame percorra dois ciclos de avanço e recuo. Consequentemente, a frequência de pulsação do arame corresponde ao dobro da frequência de rotação do motor.

As frequências máximas obtidas nos ensaios superam aquelas encontradas na maioria dos dispositivos comerciais para pulsação da alimentação de arame de adição apresentados no Capítulo III, evidenciando a ampla faixa operacional do dispositivo desenvolvido e seu potencial para aplicações que demandam maiores frequências de pulsação da alimentação de arame.

4.6 Considerações Parciais

O dispositivo pulsador de alimentação de arame construído mostrou-se funcional e compatível com alimentadores e tochas convencionais dos processos TIG e MIG/MAG, mesmo com arames de diferentes materiais e diâmetros. A caracterização realizada demonstrou: (a) o alcance de amplitudes da ordem de 2 a 15 mm, moduláveis pela posição da luva e pelo comprimento livre do conduíte; (b) a consistência das frequências resultantes em relação aos valores de referência (selecionados) em até 25 Hz; (c) a baixa influência do diâmetro do arame sobre a amplitude de pulsação dentro das condições níveis ensaiados; e (d) a aplicabilidade do dispositivo a materiais diferentes, como aço carbono e alumínio. A consolidação desses resultados fornece a base para a caracterização geral do comportamento do processo de soldagem na presença de pulsação da alimentação de arame, como a ser apresentada no Capítulo V.

CAPÍTULO V

DEFINIÇÃO E AVALIAÇÃO DO ENVELOPE DE TRABALHO

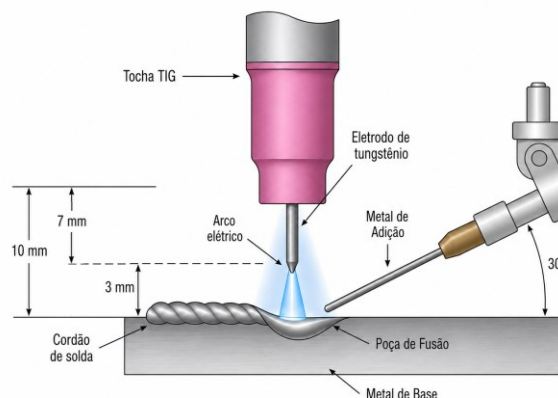
Uma vez definido o comportamento do dispositivo pulsador de arame em bancada (apresentado no Capítulo IV), a etapa seguinte (apresentada nesse capítulo) consistiu em estabelecer a faixa operacional (envelope de trabalho) em que a soldagem TIG com pulsação da alimentação de arame possa produzir depósitos aceitáveis sob o ponto de vista superficial e morfológico, e em avaliar, dentro desse envelope, como os parâmetros de pulsação influenciam a geometria do cordão de solda. Utilizando um modo de operação específico da fonte de soldagem que foi empregada, que permite o ajuste de múltiplos parâmetros do processo, foram determinadas as condições-limite da velocidade de alimentação de arame (V_a) em função da corrente de soldagem e da velocidade de soldagem empregadas, estabelecendo-se, assim, o envelope de trabalho para esse parâmetro.

5.1 Materiais e Métodos

Os ensaios foram realizados com simples deposição na posição plana sobre chapas de aço carbono comum de dimensões de $200 \times 50 \times 6,35$ mm. Como metal de adição empregou-se arame de aço inoxidável AWS 308L com 1,0 mm de diâmetro. A seleção desse material deveu-se à sua disponibilidade no laboratório e à facilidade de preparação e análise das macrografias, uma vez que o contraste obtido entre a zona fundida e o metal de base favorece a identificação e a medição das características geométricas do cordão de solda. Como eletrodo do processo TIG utilizou-se o EWTh-2, no caso com 2,4 mm de diâmetro e com ângulo de afiação na ponta de 60° . Os parâmetros mantidos constantes durante os ensaios são apresentados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Parâmetros mantidos constantes para avaliação do efeito da pulsação da alimentação de arame com esquema para correspondência visual

Parâmetro	Valor
Distância eletrodo-peça	3 mm
Distância bocal-peça	10 mm
Distância ponta do eletrodo-bocal	7 mm
Distância arame-eletrodo	3,5 mm
Velocidade de soldagem	10 cm/min
Ângulo de alimentação do arame	30°
Vazão de gás	13 L/min
Tipo de gás	Argônio



A Figura 5.1 mostra a bancada experimental empregada nos experimentos realizados neste capítulo, que no caso foi constituída por uma fonte de soldagem IMC modelo DIGIPlus® A7, um alimentador de arame, o dispositivo de pulsação da alimentação de arame, um sistema de movimentação linear para deslocamento do corpo de prova, um sistema de aquisição e condicionamento de sinais e uma tocha TIG adaptada com suporte para adição de arame (para adição à frente da poça de fusão).

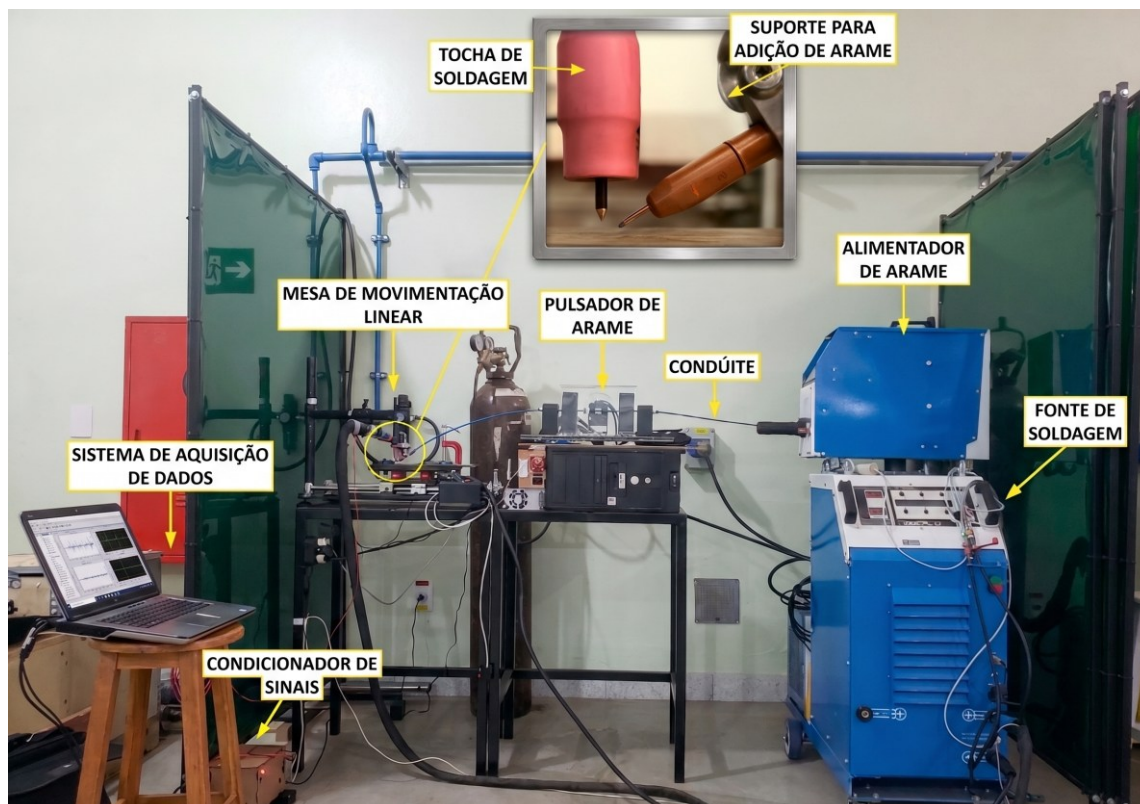


Figura 5.1 - Bancada experimental utilizada para a realização dos testes (em detalhe tocha TIG com suporte para adição de arame) para definição e avaliação do envelope de trabalho

5.2 Definição do Envelope de Trabalho

Os ensaios de determinação dos limites operacionais foram realizados com a fonte de soldagem operando no modo MIX. Esse recurso permite a programação prévia de múltiplos conjuntos de parâmetros de soldagem e dos respectivos tempos de execução, de modo que a fonte alterna automaticamente entre as configurações programadas ao longo de um único cordão. Para cada condição experimental, foram programados três conjuntos de parâmetros (denominados P4, P3 e P2) correspondentes a diferentes velocidades de alimentação de arame (V_a), mantendo-se fixa a corrente de soldagem (I).

O tempo de execução de cada conjunto de parâmetros foi ajustado em função da velocidade de soldagem (V_s) de modo a garantir um comprimento de deposição de aproximadamente 50 mm para cada condição avaliada. Para a velocidade de soldagem de 10 cm/min, por exemplo, foi adotado um tempo de execução de 30.000 ms. Dessa forma, cada ensaio produziu, em sequência,

três segmentos de cordão correspondentes às condições P4, P3 e P2, cada uma associada a uma velocidade de alimentação de arame distinta. Essa estratégia permitiu uma comparação visual direta das diferentes condições de soldagem em um mesmo corpo de prova, facilitando a identificação dos limites operacionais do processo.

A partir de uma condição inicial estabelecida em ensaios preliminares, a V_a foi incrementada ou decrementada em passos de 0,2 m/min, valor definido com base na resolução de ajuste do alimentador de arame e na sensibilidade observada do processo às variações desse parâmetro. Quando o objetivo era identificar o limite superior, a V_a era progressivamente aumentada em P2 (valor mais alto), mantendo-se P3 e P4 como referência intermediária e inferior, respectivamente. Para a identificação do limite inferior, a V_a era decrementada a partir de um valor estabelecido nos ensaios anteriores. O procedimento era repetido até que fossem observados, em ao menos um dos segmentos, defeitos visuais que caracterizassem a condição como inaceitável.

A Tabela 5.2 apresenta a sequência de ensaios realizada para $V_s = 10$ cm/min. As células destacadas em negrito indicam os valores de V_a que produziram cordões identificados como limítrofes, seja por excesso (limite superior) seja por insuficiência (limite inferior) de material depositado.

Tabela 5.2 - Sequência de ensaios para determinação dos limites operacionais ($V_s = 10$ cm/min).

Teste	V_a P4 (m/min)	V_a P3 (m/min)	V_a P2 (m/min)	V_s (cm/min)	I (A)
1	0,8	1,0	1,2	10	120
2	1,4	1,6*	1,8	10	120
3	0,6	0,4	0,2*	10	120
4	0,6	0,4	0,2*	10	160
5	1,8	2,0	2,4	10	160
6	2,0	2,2*	2,4	10	160
7	0,8	0,6	0,4*	10	200
8	2,2	2,4	2,6	10	200
9	2,6	2,8*	3,0	10	200

* Células em negrito indicam condições identificadas como limítrofes.

A definição dos limites operacionais baseou-se na inspeção visual dos cordões produzidos, mas sem a utilização de medições dimensionais nesta etapa. Os critérios foram estabelecidos de forma a garantir cordões contínuos, geometricamente estáveis e isentos de defeitos superficiais significativos.

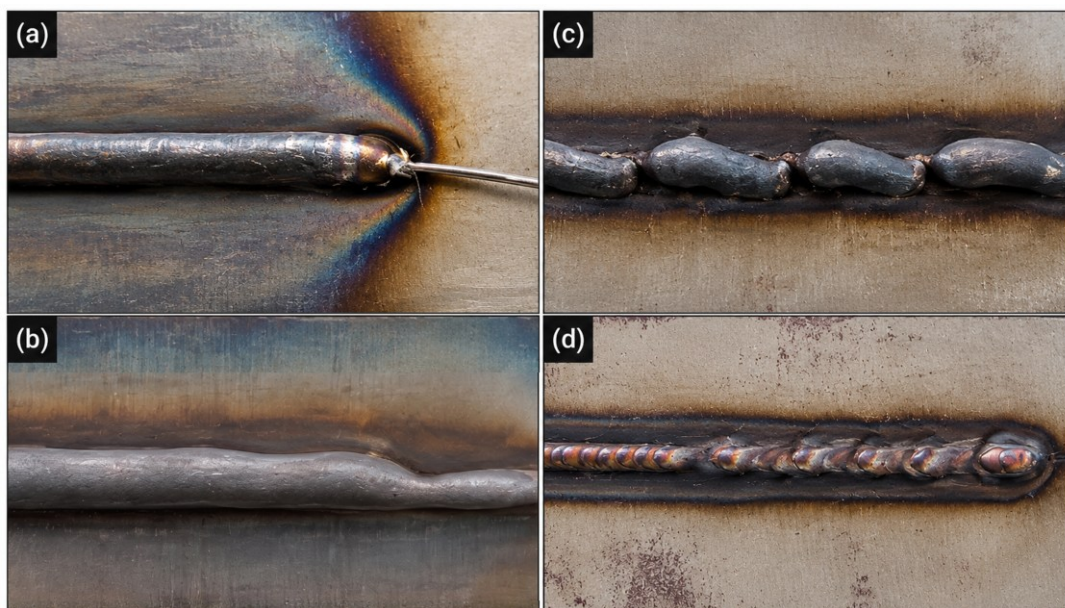


Figura 5.2 - Exemplos dos defeitos visuais utilizados como critério de rejeição na determinação do envelope operacional. (a) poça atingindo o eletrodo; (b) molhamento insuficiente; (c) irregularidade/interrupção; (d) *humping*

Para a determinação do limite superior da velocidade de alimentação de arame (V_a), os cordões foram considerados inadequados quando apresentavam evidências de instabilidade do processo ou de comprometimento da geometria da solda. Dentre os critérios de reprovação observados estavam o excesso de material depositado, que resultava no aumento excessivo da poça de fusão a ponto de esta atingir o eletrodo, comprometendo a estabilidade operacional do processo (Figura 5.2-a); a ocorrência de molhamento insuficiente do metal de base, caracterizada por ângulos de molhamento inferiores a 90° , avaliados por inspeção visual do perfil do cordão com auxílio de gabarito angular (Figura 5.2-b); e a presença de irregularidades superficiais acentuadas ou interrupções no cordão, associadas à instabilidade da poça de fusão sob elevadas taxas de deposição (Figura 5.2-c). Para o limite inferior de V_a , o critério de rejeição foi a ocorrência de irregularidades do tipo *humping*, caracterizadas pelo estreitamento da largura do cordão e pela perda de continuidade da deposição (ver Figura 5.2-d). Em algumas condições (para as correntes de 120 e 160 A) o limite inferior coincidiu com a menor V_a disponível na fonte (0,2 m/min), sem que fossem observados defeitos de *humping*, sendo este valor adotado como limite operacional por restrição de equipamento.

A partir dos valores limites obtidos para cada combinação de corrente de soldagem e velocidade de alimentação de arame foi construído o envelope operacional apresentado na Figura 5.3. Esse envelope delimita a região de parâmetros em que foram produzidos cordões contínuos, geometricamente estáveis e isentos de defeitos superficiais significativos, servindo como base para a seleção das condições experimentais utilizadas nas etapas subsequentes deste trabalho.

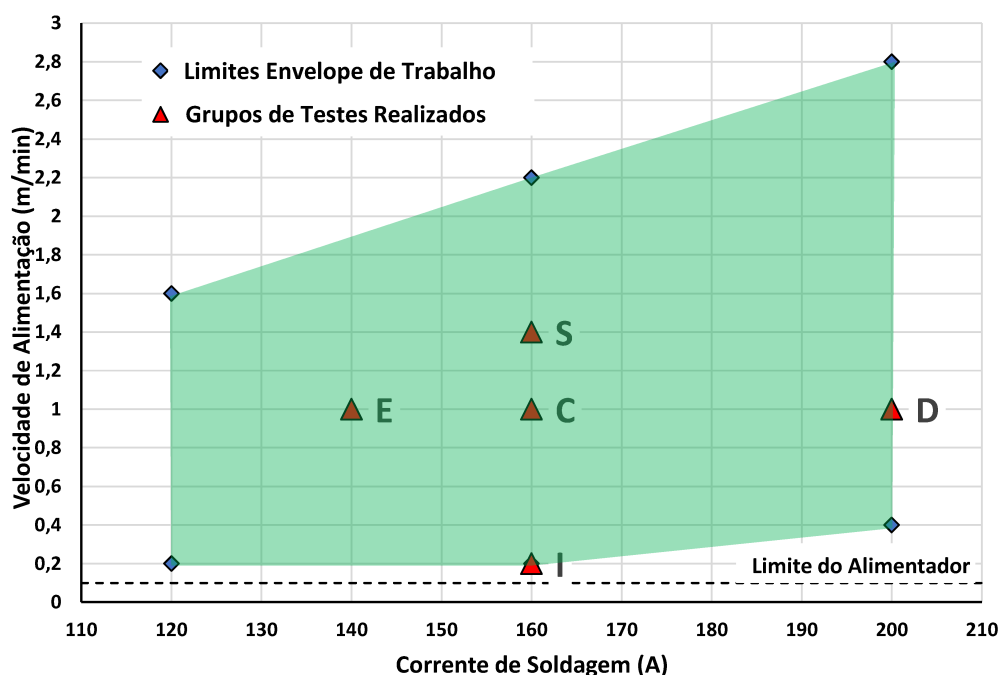


Figura 5.3 - Envelope de trabalho para velocidade de soldagem de 10 cm/min, indicando os grupos de ensaios C (central), E (esquerda), D (direita), S (superior) e I (inferior).

Com base no envelope operacional estabelecido, foram selecionados cinco grupos de ensaios, identificados na Figura 5.3 pelas letras C, E, D, S e I. Para cada grupo, investigou-se a influência da pulsação da alimentação de arame por meio da combinação de três frequências de pulsação (2, 11 e 20 Hz) e duas amplitudes de pulsação (5,95 e 9,85 mm). Adicionalmente, foi realizado um ensaio de referência com alimentação contínua (sem pulsação) de arame, totalizando sete condições experimentais por grupo.

A definição dos grupos experimentais teve como ponto de partida a condição central do envelope operacional (grupo C), sendo posteriormente estendida nas direções dos seus limites, de modo a avaliar o efeito da pulsação sob diferentes combinações de corrente de soldagem e velocidade de alimentação de arame. Nos grupos S, C e I, a corrente de soldagem foi mantida constante em 160 A, enquanto nos grupos E, C e D a velocidade de alimentação de arame foi mantida constante em 1,0 m/min.

Algumas condições inicialmente previstas não puderam ser utilizadas, em razão de limitações observadas durante os ensaios preliminares. Nas combinações correspondentes a 160 A e 2,2 m/min, bem como a 120 A e 1,0 m/min, pelas condições resultantes, verificou-se a ocorrência do fenômeno conhecido como *wire stubbing* (Pigozzo et al., 2024b), caracterizado pelo contato da ponta do arame com o metal de base no fundo da poça antes de sua completa fusão. Esse comportamento indica que a capacidade de fusão do arco/poça foi insuficiente para acomodar a taxa de alimentação imposta, resultando na deformação mecânica do arame e comprometendo a estabilidade do processo, bem como a repetibilidade dos resultados. Por esse motivo, os grupos S e E foram definidos como alternativas experimentalmente viáveis, preservando a representatividade das regiões extremas do envelope operacional.

5.3 Planejamento experimental e resultados

A Tabela 5.3 apresenta o planejamento experimental adotado, bem como os resultados obtidos para as características geométricas dos cordões de solda, incluindo largura, reforço, penetração e diluição. Essas variáveis foram determinadas a partir da análise de três seções transversais de cada cordão, utilizando o software ImageJ®. Adicionalmente, são apresentados os valores de energia de soldagem e do tempo de permanência do arame de adição na região da fonte térmica. Neste trabalho, fonte térmica designa a região total de influência térmica do processo, abrangendo tanto a coluna do arco elétrico quanto a poça de fusão. O arame está sujeito a mecanismos distintos nesses locais: aquecimento por radiação, convecção e fluxo de plasma quando inserido no arco sem tocar a poça; e por condução, ao entrar em contato físico com a poça. A permanência nessa região mais abrangente é inferida pelo sinal de tensão eletrodo-arame (V_{EA}).

Tabela 5.3 - Planejamento dos ensaios com pulsação da alimentação de arame e aspectos geométricos resultantes, energia e a permanência do arame na fonte térmica (PAFT) (Onde: V_a = velocidade de alimentação; I = corrente de soldagem; A = amplitude; F = frequência de pulsação)

Ensaio	V_a (m/min)	I (A)	A (mm)	F (Hz)	Largura (mm)	Reforço (mm)	Penetração (mm)	Diluição (%)	Energia (J/mm)	PAFT (%)
C0	1,0	160	0	0	$10,27 \pm 0,08$	$1,63 \pm 0,00$	$1,03 \pm 0,04$	$30 \pm 1,92$	957,22	100
C1	1,0	160	5,95	2	$9,04 \pm 0,09$	$1,75 \pm 0,05$	$1,23 \pm 0,11$	$42 \pm 0,09$	1015,56	42
C2	1,0	160	5,95	11	$7,62 \pm 0,59$	$2,27 \pm 0,08$	$0,79 \pm 0,03$	$22 \pm 1,83$	946,66	51
C3	1,0	160	5,95	20	$7,16 \pm 0,26$	$2,25 \pm 0,13$	$0,97 \pm 0,03$	$25 \pm 0,76$	939,41	55
C4	1,0	160	9,85	2	$7,36 \pm 0,22$	$2,18 \pm 0,02$	$1,71 \pm 0,06$	$42 \pm 1,41$	812,16	40
C5	1,0	160	9,85	11	$5,24 \pm 0,01$	$2,72 \pm 0,09$	$1,82 \pm 0,03$	$34 \pm 0,77$	951,78	42
C6	1,0	160	9,85	20	$7,14 \pm 0,29$	$2,33 \pm 0,19$	$1,23 \pm 0,15$	$35 \pm 1,48$	1019,93	45
D0	1,0	200	0	0	$12,04 \pm 0,11$	$1,46 \pm 0,03$	$1,36 \pm 0,04$	$40 \pm 3,75$	1200,17	100
D1	1,0	200	5,95	2	$10,61 \pm 0,13$	$1,67 \pm 0,07$	$1,80 \pm 0,10$	$52 \pm 0,30$	1141,48	48
D2	1,0	200	5,95	11	$10,05 \pm 0,15$	$1,58 \pm 0,13$	$1,40 \pm 0,23$	$47 \pm 1,62$	1149,34	50
D3	1,0	200	5,95	20	$10,21 \pm 0,12$	$1,51 \pm 0,05$	$1,28 \pm 0,10$	$48 \pm 1,59$	1157,31	54
D4	1,0	200	9,85	2	$10,17 \pm 0,25$	$1,61 \pm 0,07$	$1,92 \pm 0,16$	$54 \pm 0,45$	1213,78	42
D5	1,0	200	9,85	11	$10,54 \pm 0,27$	$1,74 \pm 0,02$	$1,43 \pm 0,07$	$50 \pm 1,34$	1320,23	42
D6	1,0	200	9,85	20	$9,61 \pm 0,23$	$1,61 \pm 0,10$	$1,42 \pm 0,22$	$48 \pm 1,68$	1340,53	27
E0	1,0	140	0	0	$6,28 \pm 0,35$	$2,36 \pm 0,20$	$1,39 \pm 0,09$	$32 \pm 0,70$	667,70	100
E1	1,0	140	5,95	2	$5,32 \pm 0,32$	$2,68 \pm 0,02$	$1,28 \pm 0,13$	$26 \pm 1,39$	667,62	48
E2	1,0	140	5,95	11	$4,65 \pm 0,24$	$2,81 \pm 0,08$	$0,92 \pm 0,06$	$18 \pm 1,60$	698,34	44
E3	1,0	140	5,95	20	$5,09 \pm 0,22$	$2,73 \pm 0,02$	$0,71 \pm 0,03$	$15 \pm 0,50$	713,35	36
E4	1,0	140	9,85	2	$6,42 \pm 0,17$	$2,34 \pm 0,04$	$1,44 \pm 0,09$	$33 \pm 2,25$	727,39	37
E5	1,0	140	9,85	11	$5,67 \pm 0,20$	$2,63 \pm 0,19$	$1,21 \pm 0,03$	$29 \pm 3,40$	797,58	30
E6	1,0	140	9,85	20	$5,36 \pm 0,02$	$2,75 \pm 0,11$	$1,41 \pm 0,10$	$31 \pm 1,75$	807,84	29
S0	1,4	160	0	0	$8,85 \pm 0,34$	$2,42 \pm 0,15$	$0,83 \pm 0,08$	$19 \pm 0,80$	849,45	91
S1	1,4	160	5,95	2	$6,13 \pm 0,07$	$3,21 \pm 0,03$	$1,53 \pm 0,05$	$25 \pm 0,40$	881,57	64
S2	1,4	160	5,95	11	$6,27 \pm 0,22$	$3,31 \pm 0,05$	$1,09 \pm 0,24$	$17 \pm 1,74$	882,35	62
S3	1,4	160	5,95	20	$6,34 \pm 0,16$	$3,36 \pm 0,11$	$0,96 \pm 0,02$	$17 \pm 1,42$	882,71	39
S4	1,4	160	9,85	2	$7,02 \pm 0,08$	$2,90 \pm 0,13$	$1,51 \pm 0,03$	$30 \pm 1,19$	806,05	50
S5	1,4	160	9,85	11	$7,83 \pm 0,16$	$2,96 \pm 0,06$	$0,82 \pm 0,04$	$24 \pm 0,86$	916,88	40
S6	1,4	160	9,85	20	$7,92 \pm 0,27$	$2,92 \pm 0,17$	$1,05 \pm 0,09$	$27 \pm 1,96$	939,15	40
I0	0,2	160	0	0	$7,57 \pm 0,31$	$0,57 \pm 0,06$	$2,08 \pm 0,04$	$79 \pm 0,49$	1074,33	81
I1	0,2	160	5,95	2	$8,06 \pm 0,27$	$0,55 \pm 0,05$	$2,38 \pm 0,29$	$81 \pm 1,52$	1140,45	30
I2	0,2	160	5,95	11	$7,09 \pm 0,12$	$0,73 \pm 0,05$	$2,87 \pm 0,04$	$81 \pm 0,57$	1154,40	21
I3	0,2	160	5,95	20	$6,90 \pm 0,26$	$0,64 \pm 0,02$	$2,96 \pm 0,18$	$83 \pm 0,11$	1143,94	28
I4	0,2	160	9,85	2	$7,89 \pm 0,32$	$0,24 \pm 0,06$	$1,85 \pm 0,24$	$89 \pm 1,93$	1059,65	30
I5	0,2	160	9,85	11	$6,32 \pm 0,57$	$0,40 \pm 0,09$	$1,69 \pm 0,47$	$84 \pm 0,57$	1060,48	37
I6	0,2	160	9,85	20	$6,42 \pm 0,46$	$0,56 \pm 0,05$	$2,48 \pm 0,11$	$84 \pm 1,01$	1041,93	47

Na sequência, apresenta-se uma análise da influência das condições de pulsação da alimentação de arame sobre a geometria dos cordões de solda e sobre os fenômenos de transferência metálica observados durante o processo. Para isso, são correlacionados os parâmetros de pulsação com as características geométricas obtidas, bem como com o comportamento do arame na interação com a fonte térmica (arco elétrico e poça de fusão), buscando identificar os mecanismos responsáveis pelas variações observadas entre as diferentes condições experimentais.

5.4 Efeito sobre a geometria dos cordões

Nas subseções a seguir são apresentadas e discutidas as tendências observadas nos principais parâmetros geométricos do cordão em função da pulsação da alimentação de arame. Os gráficos referidos nesta seção possuem, em seu eixo horizontal, a variação da frequência de pulsação do arame e, em seu eixo vertical, a grandeza geométrica avaliada. A linha tracejada representa o ensaio de referência com alimentação contínua. A amplitude de 5,95 mm é destacada por pontos em cor laranja e a amplitude de 9,85 mm pela cor azul. Os gráficos superiores correspondem às condições ensaiadas com velocidade de alimentação constante (1,0 m/min - grupos E, C e D) e os inferiores, às condições com corrente de soldagem constante (160 A - grupos S, C e I). O gráfico do ponto central (grupo C) é repetido em ambos os conjuntos para facilitar a comparação.

5.4.1 Reforço do cordão

Pela Figura 5.4 (superior) nota-se que, conforme esperado, para velocidade de alimentação constante (1,0 m/min) o reforço diminuiu com o aumento da corrente de soldagem, uma vez que maior aporte térmico implica maior molhamento do cordão. Pela Figura 5.4 (inferior), mantendo-se a corrente constante (160 A), observou-se aumento do reforço com o aumento da velocidade de alimentação, em razão do maior volume de material depositado para o mesmo aporte térmico.

A comparação entre os ensaios com alimentação pulsada e aqueles realizados com alimentação contínua revelou uma tendência de aumento do reforço do cordão quando a pulsação da alimentação de arame foi empregada, efeito mais pronunciado para as correntes de 140 e 160 A. Nessas condições, observou-se ainda que o reforço tende a aumentar com a frequência de pulsação. Esse comportamento está de acordo com os resultados reportados por Riffel (2020), que atribui o fenômeno à ação da tensão superficial da poça de metal fundido. Segundo este autor, e pelo que também foi observado nos testes realizados nessa tese, durante a fase de recuo do arame, a tensão superficial tende a “puxar” por um efeito de arraste do arame o metal fundido para cima, promovendo um aumento do reforço e, simultaneamente, dada a mesma taxa de adição de material (velocidade de alimentação selecionada no alimentador), uma redução da largura do

cordão. Para a corrente de 200 A, especialmente na condição com amplitude de pulsação de 9,85 mm, esse comportamento tornou-se menos evidente. Nessa situação, o maior aporte térmico proporcionou uma poça de fusão com maior volume, favorecendo o espalhamento do metal líquido e, ao que parece, reduzindo a influência dos mecanismos associados à pulsação da alimentação de arame. Como consequência, o efeito da tensão superficial induzido pelo movimento de recuo do arame pode ter sido parcialmente sobreposto pelos efeitos térmicos predominantes.

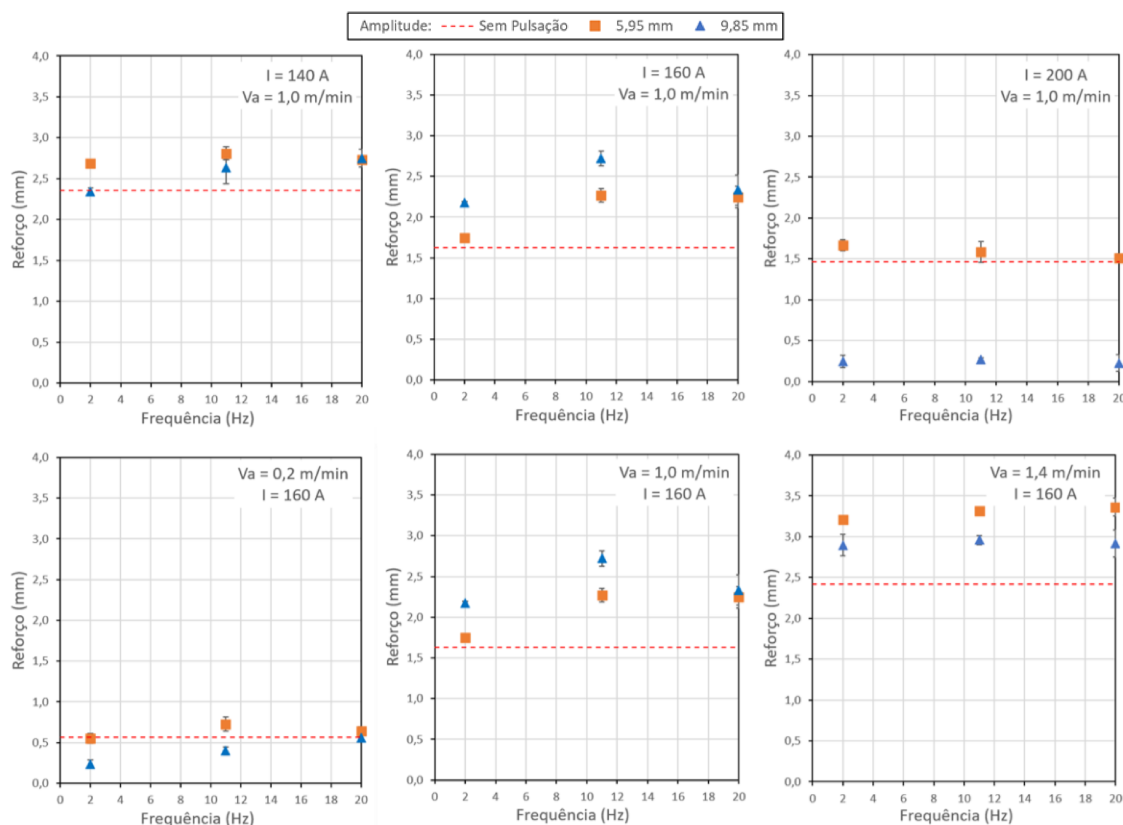


Figura 5.4 - Efeitos da pulsação da alimentação de arame sobre o reforço dos cordões: (sup.) ensaios com velocidade de alimentação constante (1,0 m/min); (inf.) ensaios com corrente de soldagem constante (160 A)

Além disso, observa-se que o aumento da velocidade de alimentação do arame e, consequentemente, da taxa de deposição, não alterou de forma significativa as tendências qualitativas anteriormente discutidas. Independentemente do volume de material adicionado, os efeitos da pulsação sobre a geometria do cordão permaneceram evidentes, indicando que os mecanismos associados à pulsação da alimentação de arame continuaram atuando mesmo sob condições de maior taxa de deposição.

Os resultados referentes ao tempo de permanência do arame de adição na região da fonte térmica (arco elétrico e poça de fusão), apresentados na Figura 5.5, mostram que, com exceção da condição de menor velocidade de alimentação de arame (0,2 m/min), o aumento da amplitude de pulsação resultou em uma redução do tempo de permanência do arame na região da fonte térmica (fato decorrente dos movimentos cíclicos de avanço e recuo impostos ao arame pelo mecanismo

de pulsação utilizado). Dessa forma, enquanto permanece em contato com a poça de fusão, o arame atua como uma barreira à incidência direta do arco sobre essa região, alterando a distribuição da energia transferida pelo arco. Com o recuo periódico do arame, essa interferência é reduzida e o arco passa a atuar mais diretamente sobre a poça de fusão, favorecendo a formação de cordões com menor reforço.

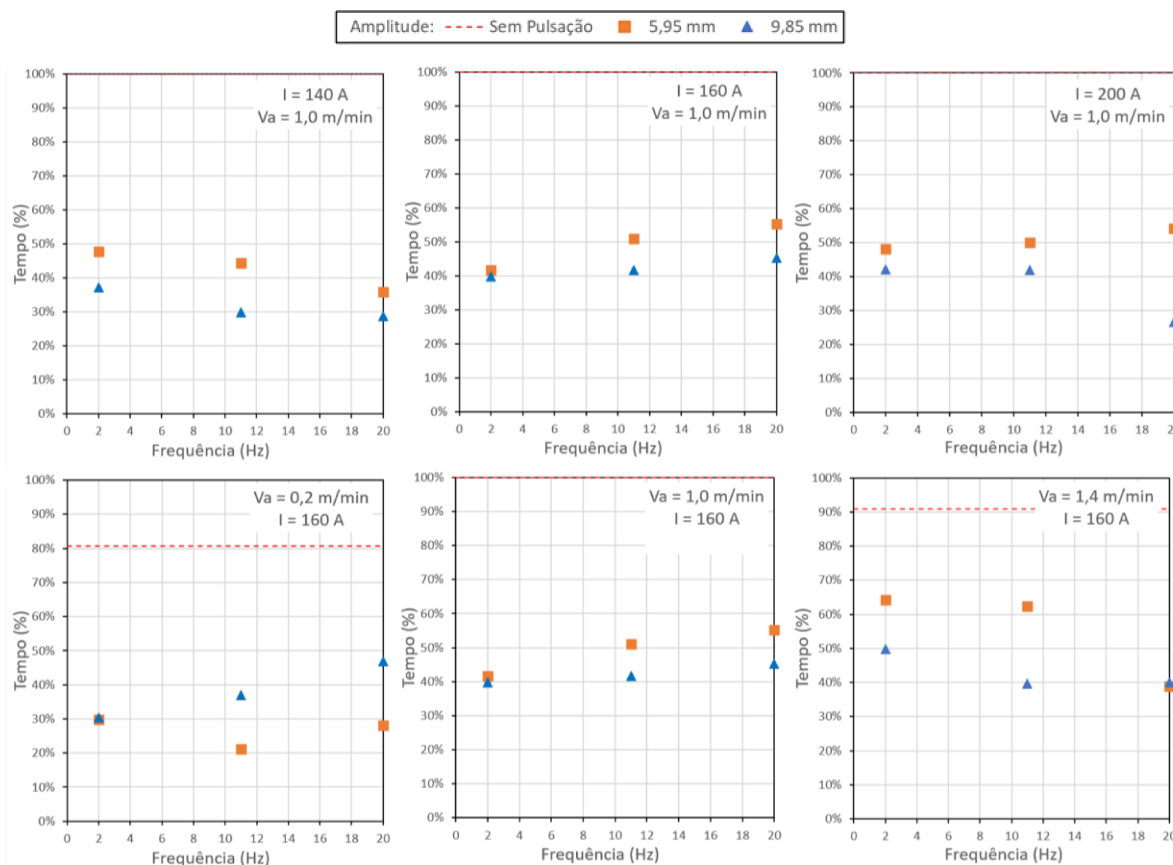


Figura 5.5 - Tempo de permanência do arame de adição na região da fonte térmica (arco/poça):
(sup.) ensaios com velocidade de alimentação constante (1,0 m/min);
(inf.) ensaios com corrente de soldagem constante (160 A)

5.4.2 Largura do cordão

Conforme esperado, a largura dos cordões aumentou com o aumento da corrente de soldagem, Figura 5.6 (superior), resultado associado ao maior aporte térmico e ao consequente aumento do volume da poça de fusão por maior fusão do metal de base, comportamento coerente com a análise anteriormente realizada para o reforço do cordão. Em comparação com os ensaios de referência com alimentação contínua, observou-se uma tendência de redução da largura quando foi empregada a pulsação da alimentação de arame. Entre os ensaios com pulsação, verificou-se ainda uma diminuição progressiva da largura com o aumento da frequência de pulsação, sendo que esse comportamento pode ser atribuído ao aumento do número de ciclos de avanço e recuo do arame, que intensifica os efeitos da tensão superficial por ação do arame entrando e saindo sobre a poça de fusão. Nessas condições, o efeito da tensão superficial tende a promover o aumento do

reforço, conforme discutido anteriormente. Como o volume de material depositado permanece constante, esse aumento do reforço ocorre em detrimento do espalhamento lateral da poça de fusão, resultando em cordões mais estreitos. Dessa forma, o aumento do reforço e a redução da largura constituem efeitos complementares de um mesmo mecanismo associado à ação de efeito do arame por tensão superficial durante a pulsação da alimentação.

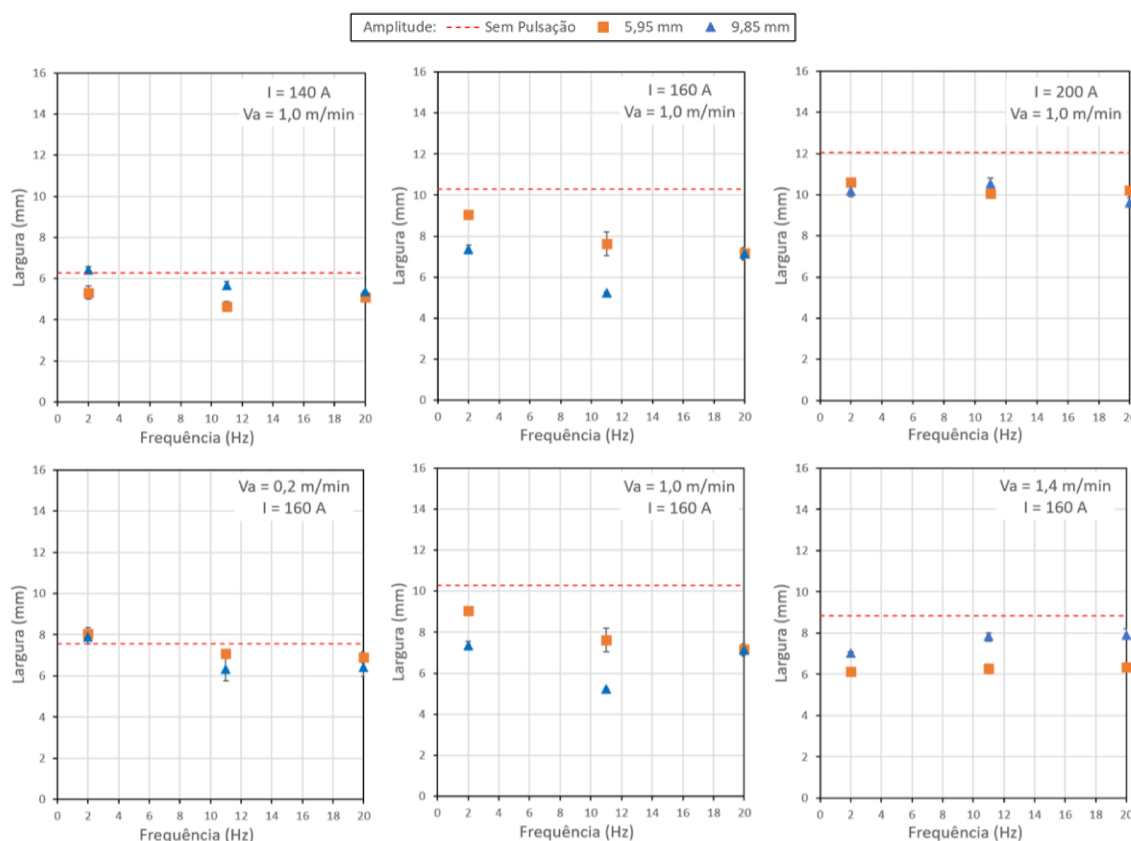


Figura 5.6 - Efeitos da pulsação da alimentação de arame sobre a largura dos cordões: (sup.) ensaios com velocidade de alimentação constante (1,0 m/min); (inf.) ensaios com corrente de soldagem constante (160 A)

A amplitude de pulsação também influenciou a largura dos cordões, embora seu efeito tenha se mostrado dependente das condições de corrente e velocidade de alimentação de arame. Na condição com a corrente de soldagem de 160 A e a velocidade de alimentação de 1,4 m/min, por exemplo, a maior amplitude de pulsação resultou em maiores valores de largura. Esse comportamento sugere que amplitudes mais elevadas reduzem o tempo de permanência do arame na região da fonte térmica, diminuindo o efeito de resfriamento exercido pelo material de adição sobre a poça de fusão. Como consequência, a poça permanece mais quente, favorecendo o molhamento e o espalhamento do cordão, o que resulta em larguras maiores.

5.4.3 Diluição

Pela Figura 5.7 (superior) observa-se, primeiramente, que o aumento da corrente de soldagem elevou a diluição, coerente com o maior aporte térmico evidenciado pelos valores de energia da Tabela 5.3. O aumento da frequência de pulsação provocou, em geral, redução da diluição, em consequência do aumento do reforço e da redução da largura do cordão (menor área fundida do metal base). Esse resultado corrobora com as observações anteriores de Riffel (2020). Nos ensaios com corrente constante, Figura 5.7 (inferior), a diluição diminuiu com o aumento da velocidade de alimentação, como esperado, uma vez que maior volume de material é depositado sobre um poder de fusão aproximadamente constante.

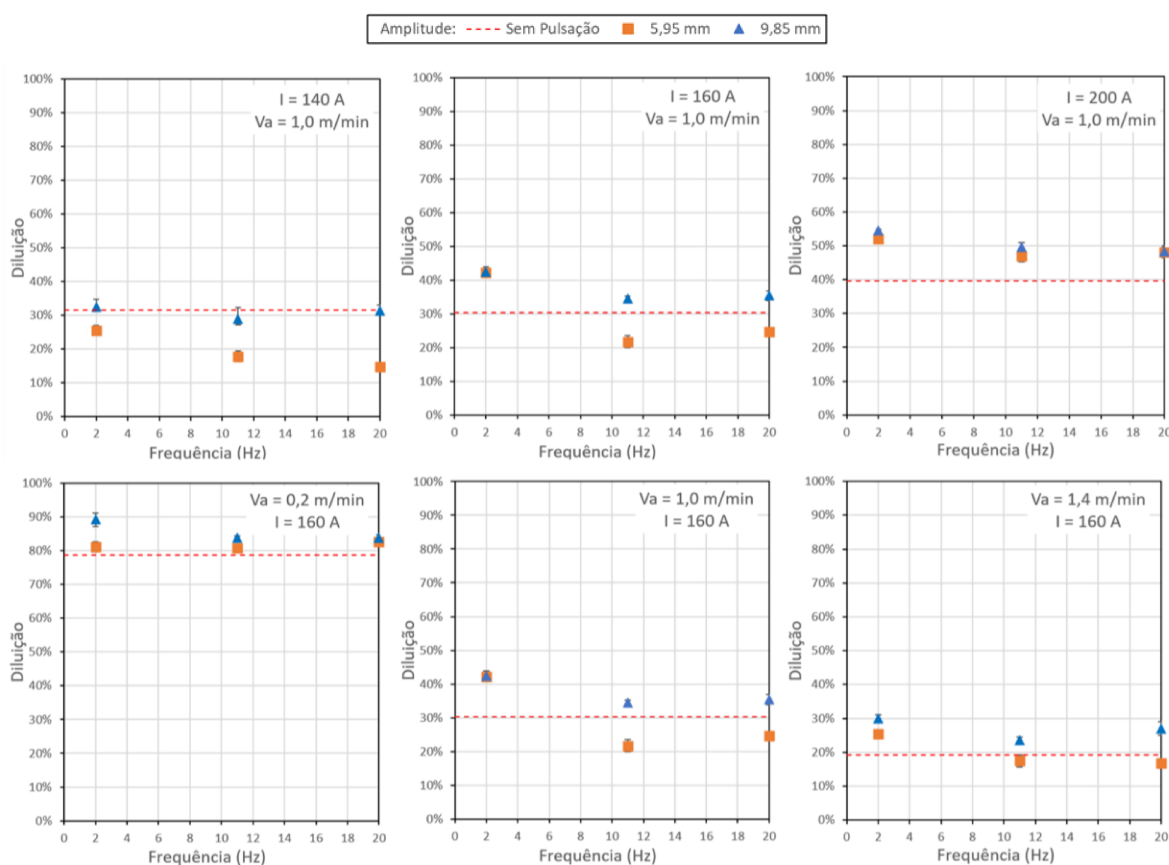


Figura 5.7 - Efeitos da pulsação da alimentação de arame sobre a diluição dos cordões: (sup.) velocidade de alimentação constante (1,0 m/min); (inf.) corrente de soldagem constante (160 A)

Nos ensaios com alimentação pulsada, observou-se ainda uma tendência de aumento da diluição com o aumento da amplitude de pulsação. Assumindo-se que, para as condições avaliadas, o arame entra em contato com a poça de fusão a cada ciclo de pulsação, conclui-se que amplitudes maiores resultam em maiores deslocamentos do arame para uma mesma frequência de pulsação. Consequentemente, o arame permanece menos tempo inserido na região do arco e em contato com a poça de fusão, reduzindo o efeito de resfriamento associado ao seu aquecimento e à sua fusão. Além disso, enquanto permanece inserido na poça, o arame pode atuar como uma barreira entre o arco e o metal de base, modificando a distribuição da energia transferida pelo arco. Com

sua retirada periódica durante a pulsação, o arco passa a atuar mais diretamente sobre a superfície da poça e o metal de base, o que, associado à menor parcela de energia consumida no aquecimento e na fusão do arame, pode favorecer maior fusão do substrato, aumentando a penetração e, conseqüentemente, a diluição.

Esse comportamento é corroborado pelos oscilogramas apresentados nas Figuras 5.8 e 5.9, nos quais foram monitorados simultaneamente os sinais de tensão do arco (entre eletrodo e peça) e de tensão eletrodo-arame (entre eletrodo e arame). A utilização conjunta desses sinais para análise da transferência metálica foi proposta por Silva et al. (2018), demonstrando que a coincidência entre os dois potenciais indica o contato do arame com a poça de fusão, enquanto oscilações na tensão eletrodo-arame estão associadas à transferência intermitente. No presente trabalho, essa metodologia foi empregada para inferir a posição instantânea do arame em relação à poça de fusão. Assim, a coincidência entre os potenciais foi interpretada como indicativa da posição avançada do arame, enquanto a redução da tensão eletrodo-arame foi associada ao seu movimento de recuo.

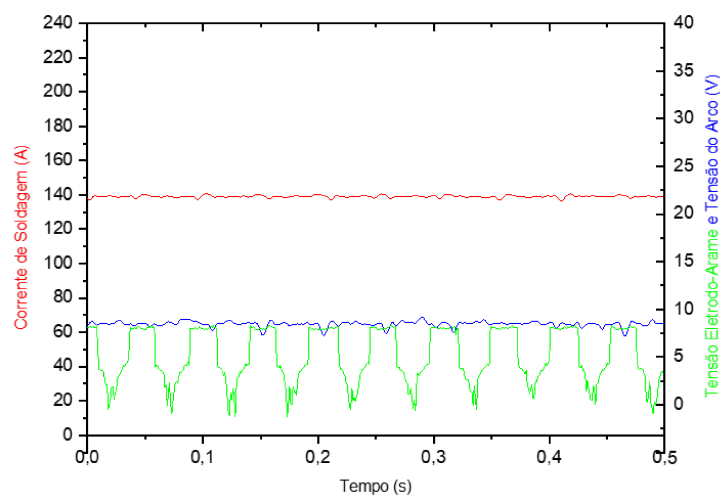


Figura 5.8 - Oscilogramas de corrente de soldagem, tensão do arco e tensão eletrodo-arame para o ensaio E3 ($F = 20$ Hz; $A = 5,95$ mm; $I = 140$ A; $V_a = 1,0$ m/min)

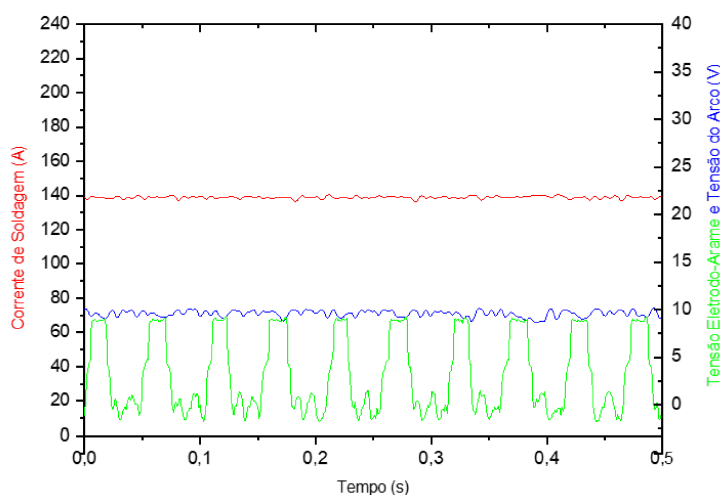


Figura 5.9 - Oscilogramas de corrente de soldagem, tensão do arco e tensão eletrodo-arame para o ensaio E6 ($F = 20$ Hz; $A = 9,85$ mm; $I = 140$ A; $V_a = 1,0$ m/min)

Pela comparação dos oscilogramas, na menor amplitude de pulsação (Figura 5.8) o sinal de tensão eletrodo-arame permanece coincidente com a tensão do arco durante intervalos mais longos, indicando maior tempo de permanência do arame na região da fonte térmica. Já para a maior amplitude (Figura 5.9), esse intervalo é reduzido, diminuindo a capacidade de resfriamento exercida pelo arame sobre a poça de fusão e favorecendo o aumento da diluição observado.

Ainda na Figura 5.7, para a corrente de 200 A observa-se atenuação do efeito da amplitude sobre a diluição, provavelmente em razão do aumento do volume da poça de fusão, que torna os efeitos de resfriamento pelo arame pulsante menos significativos.

5.4.4 Penetração e morfologia do cordão

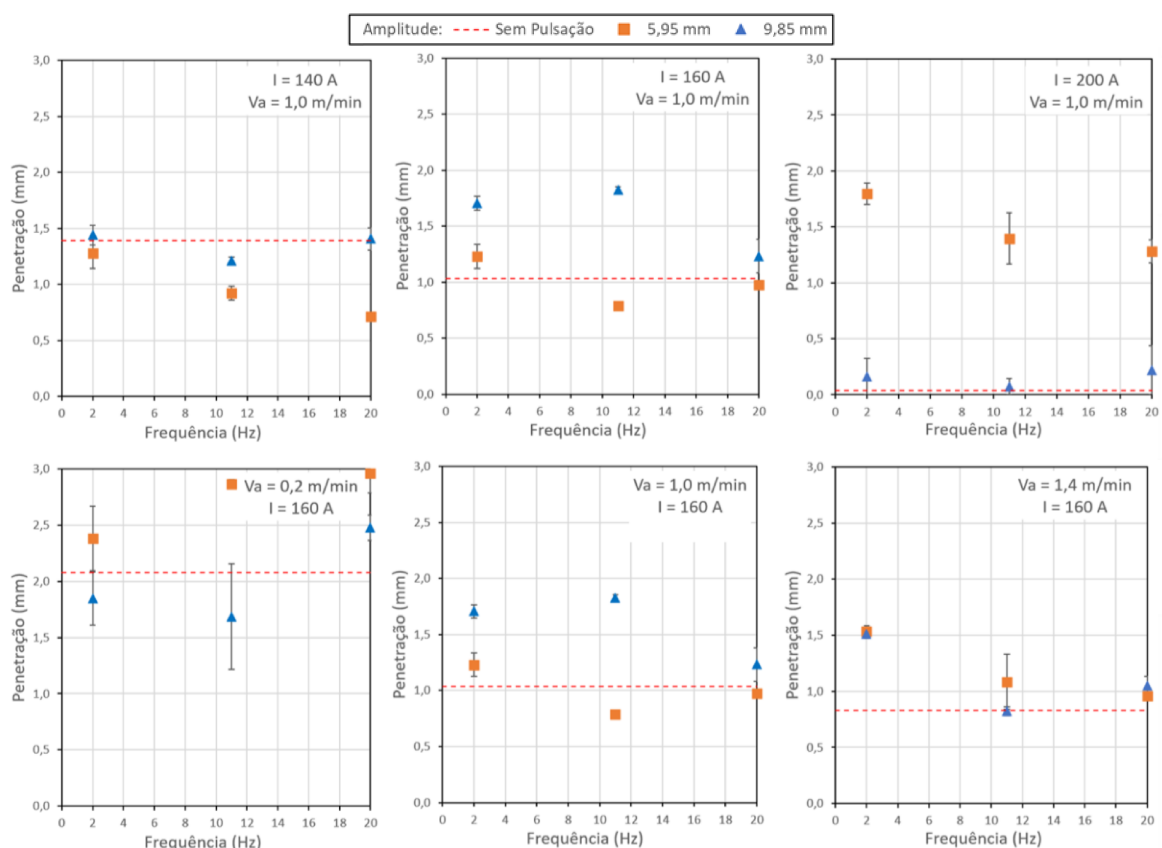
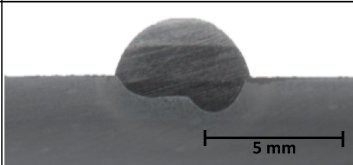
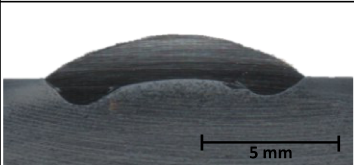
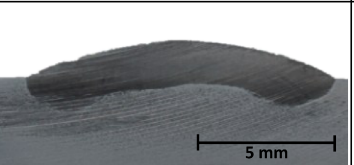
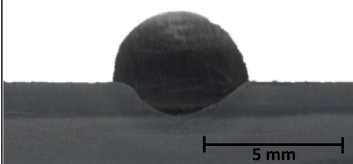
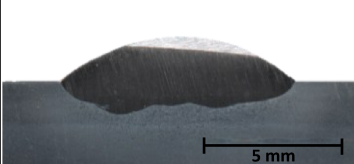
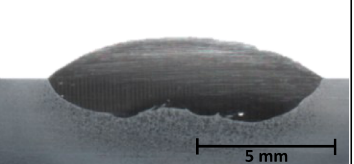
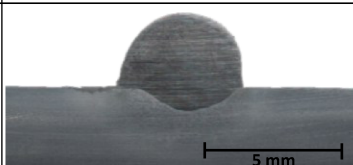
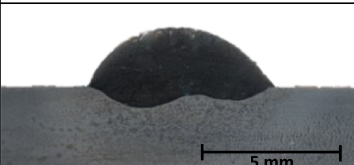
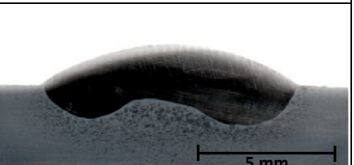
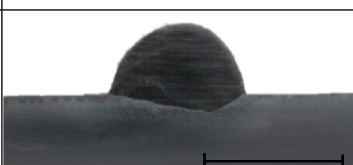
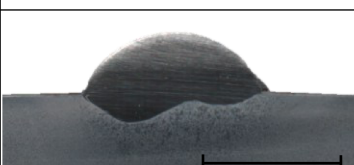
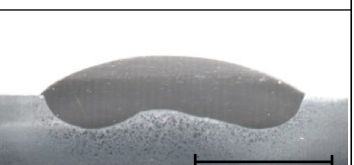
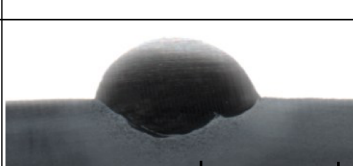
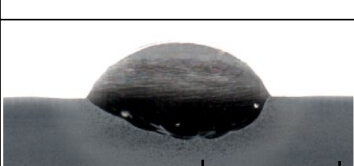
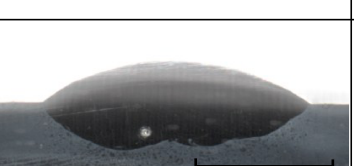
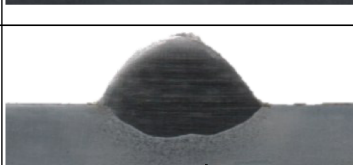
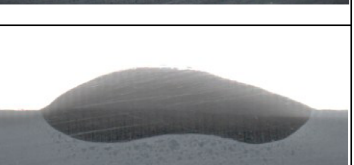
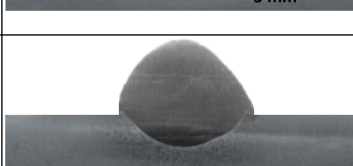
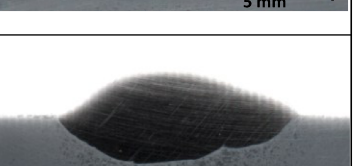


Figura 5.10 - Penetração dos cordões: (sup.) ensaios com velocidade de alimentação constante (1,0 m/min); (inf.) ensaios com corrente de soldagem constante (160 A)

Conforme mostra a Figura 5.10 (superior), para condições de velocidade de alimentação de arame constante observou-se uma leve tendência de redução da penetração com o aumento da frequência de pulsação e de aumento da penetração com o aumento da amplitude de pulsação. Entretanto, essas tendências não se manifestaram de forma uniforme para todas as condições experimentais, evidenciando uma forte interação entre os parâmetros avaliados.

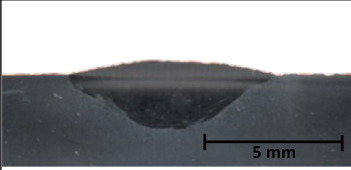
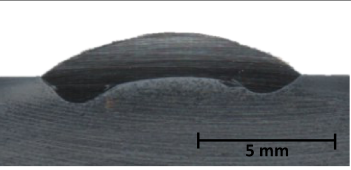
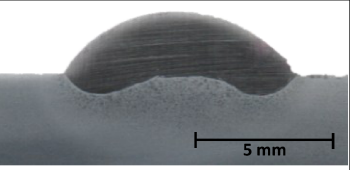
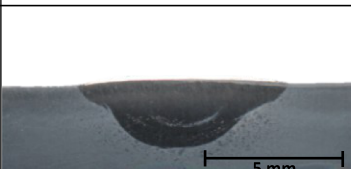
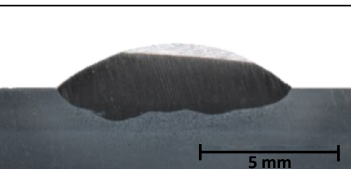
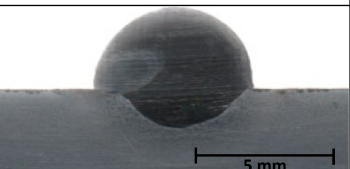
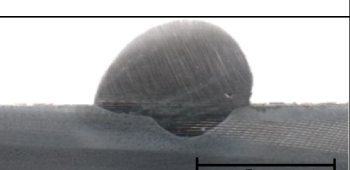
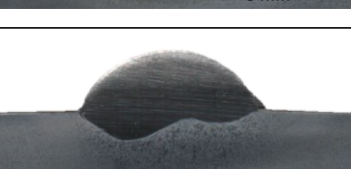
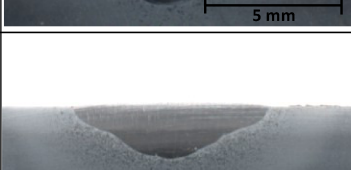
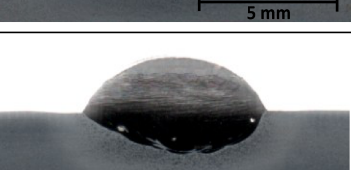
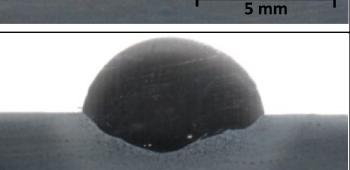
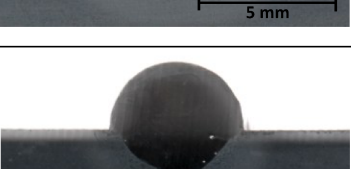
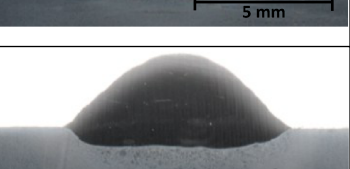
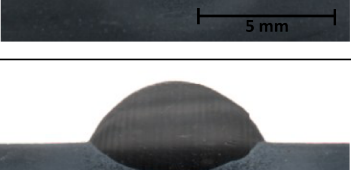
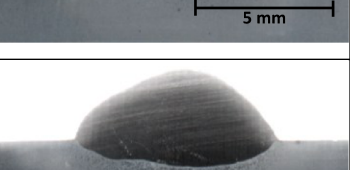
Por esse motivo, a interpretação dos resultados de penetração será realizada em conjunto com a análise das macrografias apresentadas nas Tabelas 5.4 e 5.5, uma vez que estas permitem identificar alterações morfológicas no perfil do cordão e na distribuição da área fundida, fornecendo subsídios adicionais para a compreensão dos mecanismos envolvidos nos resultados.

Tabela 5.4 - Macrografias dos cordões de solda para os ensaios com velocidade de alimentação constante (1,0 m/min)

		Corrente de Soldagem (A)					
		140	160	200			
Alimentação	Contínua				Alimentação Contínua		
	Frequência de Pulsação (Hz)	2				5,95	
		11					
		20					
		2					
		11					
		20					
		1,0			9,85		
		Velocidade de Alimentação (m/min)					
						Amplitude de Pulsação (mm)	

A análise das macrografias apresentadas nas Tabelas 5.4 e 5.5 revela que, nos ensaios realizados com alimentação contínua de arame, a penetração tende a se concentrar nas extremidades do cordão, com exceção das condições empregando velocidade de alimentação de 0,2 m/min. Em contraste, nos ensaios com alimentação pulsada observou-se uma tendência de concentração da penetração na região central do cordão, efeito mais pronunciado para a maior amplitude de pulsação e menos evidente para a corrente de soldagem de 200 A.

Tabela 5.5 - Macrografias dos cordões de solda para os ensaios com corrente de soldagem constante (160 A)

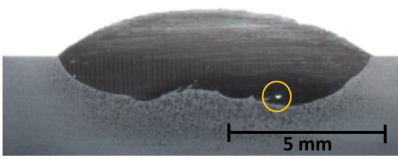
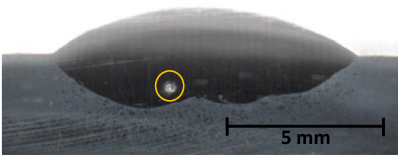
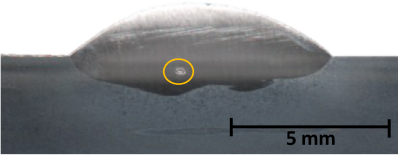
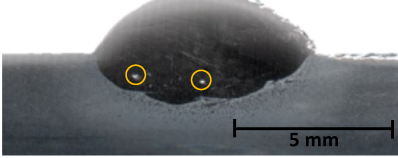
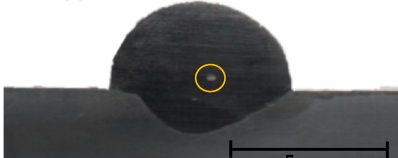
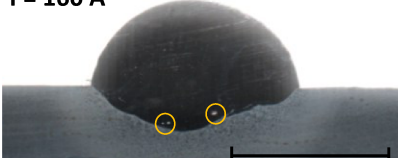
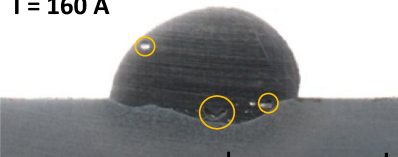
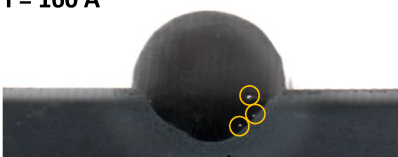
Corrente de Soldagem (A)					
160					
Alimentação Contínua				Alimentação Contínua	
Frequência de Pulsação (Hz)	2				Amplitude de Pulsação (mm)
	11				
	20				
	2				
	11				
	20				
			0,2	1,0	1,4
			Velocidade de Alimentação (m/min)		

Esse comportamento sugere que a pulsação da alimentação de arame pode modificar os mecanismos responsáveis pela distribuição de calor e pela circulação do metal líquido na poça de fusão, alterando, consequentemente, o perfil de penetração. Uma possível explicação está associada ao fluxo de Marangoni, hipótese também considerada por Jorge et al. (2018) para interpretar alterações na morfologia da zona fundida no processo MIG/MAG. Esse mecanismo decorre de gradientes de tensão superficial ao longo da superfície da poça, que induzem o escoamento do metal líquido entre regiões com diferentes tensões superficiais (MILLS et al., 1998).

Observa-se que a ocorrência de porosidade parece mais associada à frequência do que à amplitude de pulsação do arame: na menor frequência ensaiada (2 Hz) foi registrada a maior incidência de poros; em 11 Hz apenas duas amostras apresentaram porosidade; e em 20 Hz não foi observada essa ocorrência. Infere-se que, quanto maior o grau de agitação da poça, maior a capacidade de expelir possíveis bolhas de gás/vapores e, portanto, menor a probabilidade de aparecimento de poros.

A Tabela 5.7 apresenta as macrografias das seções transversais dos cordões de solda nas quais foi observada a ocorrência de porosidades, verificou-se também que as porosidades não ocorreram nas condições associadas aos menores volumes de material depositado. Esse comportamento é consistente com a menor probabilidade de aprisionamento de gases em poças de fusão reduzidas e mais rasas, bem como com a maior eficiência dos mecanismos de convecção e agitação do metal líquido em volumes menores. Nessas condições, as bolhas percorrem distâncias menores até a superfície da poça, aumentando a probabilidade de escape antes da solidificação e reduzindo a ocorrência de porosidades no cordão de solda.

Tabela 5.7 - Macrografias dos cordões que apresentaram porosidades, organizadas em função da frequência e da amplitude de pulsação da alimentação de arame

		Amplitude de Pulsação (mm)	
		5,95	9,85
Frequência de Pulsação (Hz)	2	Va = 1,0 m/min I = 200 A 	Va = 1,0 m/min I = 200 A 
		Va = 1,0 m/min I = 160 A 	Va = 1,0 m/min I = 160 A 
		Va = 1,4 m/min I = 160 A 	Va = 1,4 m/min I = 160 A 
	11	Va = 1,4 m/min I = 160 A 	Va = 1,0 m/min I = 160 A 

5.4.6 Aspecto superficial

As Tabelas 5.8 e 5.9 apresentam os aspectos superficiais dos cordões de solda obtidos para as diferentes condições experimentais. Observa-se que, nas menores frequências de pulsação, os cordões tendem a apresentar uma superfície com aspecto escamado, caracterizada pela formação de marcas periódicas ao longo do cordão. Essa morfologia é frequentemente observada em processos TIG com pulsação de corrente, especialmente quando os ciclos de transferência metálica e solidificação parcial da poça tornam-se perceptíveis na superfície do cordão.

Tabela 5.8 - Superfícies dos cordões de solda para os ensaios com velocidade de alimentação constante (1,0 m/min)

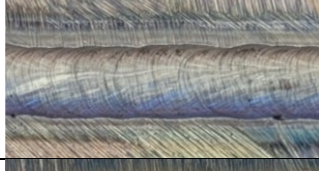
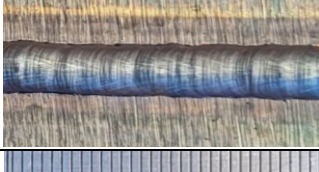
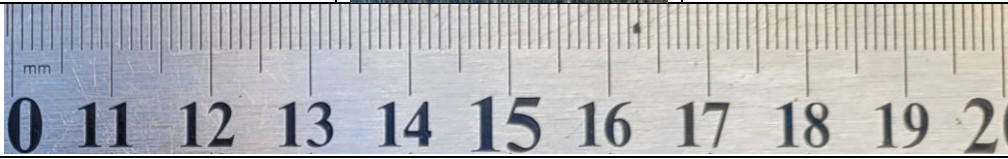
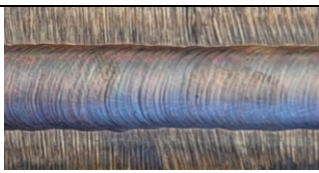
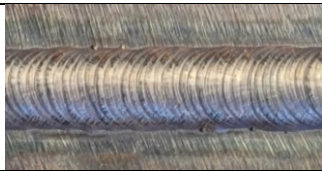
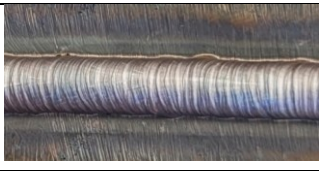
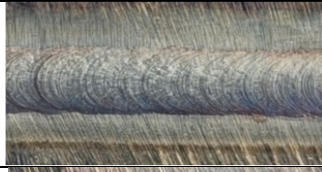
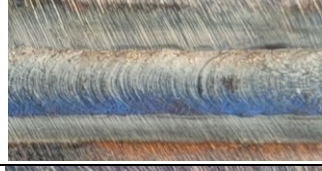
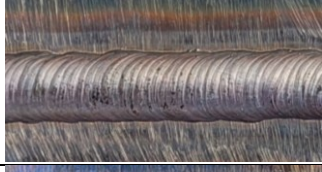
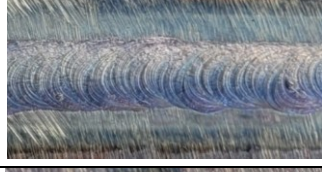
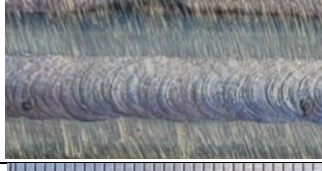
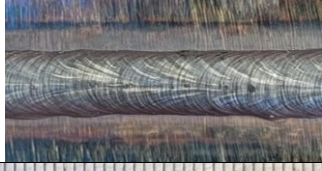
		Corrente de Soldagem (A)				
		140	160	200		
Frequência de Pulsação (Hz)	Alimentação Contínua				Alimentação Contínua	
	2				5,95	Amplitude de Pulsação (mm)
	11					
	20					
	2				9,85	
	11					
	20					
						
	1,0					
	Velocidade de Alimentação (m/min)					

Tabela 5.9 - Superfícies dos cordões de solda para os ensaios com corrente de soldagem constante (160 A)

			Corrente de Soldagem (A)						
			160						
Frequência de Pulsação (Hz)	Alimentação Contínua					Alimentação Contínua			
	2	11				5,95	Amplitude de Pulsação (mm)		
									
									
	2	11				9,85			
									
									
									
			0,2 1,0 1,4						
			Velocidade de Alimentação (m/min)						

À medida que a frequência de pulsação de alimentação é aumentada, essas marcas tornam-se progressivamente menos evidentes, resultando em cordões com acabamento superficial mais uniforme. Na maior frequência avaliada, a superfície dos cordões apresentou aspecto visual semelhante ao observado nos ensaios de referência com alimentação contínua (sem pulsação) de arame. Esse comportamento sugere que, em frequências mais elevadas, a maior taxa de repetição dos ciclos de avanço e recuo do arame reduz a percepção individual de cada evento de deposição (entrega pontual de material de adição), promovendo uma distribuição mais homogênea do metal líquido e favorecendo a obtenção de cordões com melhor acabamento superficial.

5.5 Considerações Parciais

Os resultados obtidos nesta etapa permitiram estabelecer um envelope operacional para o processo TIG com alimentação pulsada de arame, identificando combinações de corrente de soldagem e velocidade de alimentação capazes de produzir cordões com bom aspecto superficial.

De maneira geral, a pulsação da alimentação de arame exerceu influência significativa sobre a geometria dos cordões de solda quando comparada à alimentação contínua. Observou-se uma tendência de aumento do reforço e redução da largura dos cordões com esse recurso, efeitos que se tornaram mais pronunciados com o aumento da frequência de pulsação.

A análise da diluição revelou comportamentos distintos para frequência e amplitude de pulsação. Enquanto o aumento da frequência tendeu a reduzir a diluição, o aumento da amplitude promoveu seu crescimento, comportamento associado à redução do tempo de permanência do arame na região da fonte térmica e, consequentemente, à diminuição do efeito de resfriamento exercido pelo material de adição sobre a poça de fusão. Também foram observadas alterações no perfil de penetração, que passou a se concentrar mais na região central do cordão nas condições com alimentação pulsada, sugerindo modificações nos mecanismos de circulação do metal líquido e na distribuição de calor no interior da poça.

Quanto à ocorrência de descontinuidades, porosidades estiveram presentes em alguns casos, sendo mais associadas à frequência de pulsação do que à amplitude, sendo observada uma redução da incidência de poros com o aumento da frequência de pulsação. Esse comportamento foi atribuído ao aumento da agitação da poça de fusão, favorecendo a expulsão dos gases/vapores antes da solidificação do metal.

Em síntese, os resultados demonstram que a pulsação da alimentação de arame constitui uma técnica capaz de modificar significativamente a geometria do cordão, a dinâmica da poça de fusão e a qualidade final da solda. Entretanto, seus efeitos não ocorrem de forma isolada, variando em função da combinação entre frequência e amplitude de pulsação, velocidade de alimentação do arame e corrente de soldagem, o que evidencia a complexidade das interações envolvidas no processo TIG com alimentação dinâmica de arame. Esses resultados fornecem a base para os capítulos seguintes, nos quais é explorada a operação do processo TIG com a pulsação da alimentação de arame sincronizada à corrente de soldagem, visando ampliar a faixa operacional e aumentar o controle sobre a interação entre o arame e a poça de fusão.

CAPÍTULO VI

SISTEMA DE SINCRONISMO: CONCEPÇÃO, IMPLEMENTAÇÃO E VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL

Com o dispositivo pulsador de arame desenvolvido, caracterizado e validado experimentalmente (Capítulo IV), e definido o envelope de trabalho para operação em corrente constante (Capítulo V), tornou-se possível avaliar os efeitos da pulsação da alimentação de arame sobre o processo TIG. Os resultados obtidos demonstraram que tal pulsação tem efeitos na transferência metálica e na dinâmica da poça de fusão e assim influencia a geometria do cordão. Entretanto, também ficou evidenciada uma limitação inerente à operação em corrente constante: a energia fornecida pelo arco elétrico permanece inalterada ao longo do ciclo de pulsação da alimentação de material, independentemente da posição instantânea do ponta do arame. Nas condições até agora investigadas, o arco elétrico não responde de forma dinâmica aos movimentos de avanço e recuo do arame. Consequentemente, pode-se dizer que o instante de maior demanda térmica (entrada do arame na poça de fusão) não coincide com um momento de maior disponibilidade de energia do processo. Essa ausência de coordenação entre alimentação de material e aporte térmico pode limitar o controle da transferência metálica e restringir a operação em determinadas regiões do envelope de trabalho, particularmente naquelas em que a capacidade térmica do arco/poça é insuficiente para fundir o material adicionado.

Diante dessa limitação, surgiu a hipótese de que a sincronização entre a pulsação da alimentação de arame e a pulsação da corrente de soldagem pudesse ampliar o controle do processo. Ao ajustar o nível de corrente em função da posição instantânea da ponta do arame, torna-se possível concentrar o aporte térmico justamente nos instantes de contato/proximidade com o arco/poça, favorecendo a fusão do material de adição, a estabilidade da poça e a regularidade do processo de deposição. É nesse contexto que se insere o presente capítulo, que é dedicado ao desenvolvimento, implementação e avaliação experimental de um sistema de sincronismo entre a alimentação pulsada de arame e o nível da corrente de soldagem.

Portanto, este capítulo apresenta o desenvolvimento do sistema de sincronismo, incluindo sua arquitetura de hardware e software, a lógica de controle implementada e a metodologia experimental empregada para sua avaliação. São descritos dois conjuntos complementares de ensaios, destinados à validação funcional do sistema e à investigação de seus efeitos sobre o processo de deposição de material. Por fim, os resultados são analisados por meio de sinais elétricos e de imagens obtidas por câmera de alta velocidade (incluindo observações da transferência metálica) e por exame da geometria de cordões simples depositados sobre chapa, o que permitiu avaliar a efetividade do sincronismo alcançado entre a pulsação do arame e a corrente de soldagem e suas consequências gerais sobre a formação de depósitos.

6.1 Motivação e Conceito de Sincronismo

A análise dos oscilogramas obtidos nos ensaios do Capítulo V revelou que, em corrente constante, a tensão eletrodo-arama (V_{EA}) oscila periodicamente em resposta ao movimento de avanço e recuo do arame pulsado. Cada ciclo de pulsação produz uma sequência característica de eventos: (1) recuo do arame, com aumento da distância ao arco e consequente queda abrupta da V_{EA} ; (2) avanço e contato com a poça, com formação de ponte metálica e elevação da V_{EA} ; (3) manutenção da ponte metálica, com V_{EA} alta e estável; e (4) ruptura da ponte, marcada por nova redução transitória da V_{EA} . Essa sequência, identificável no sinal da V_{EA} , constitui o fundamento sobre o qual o sistema de sincronismo foi concebido.

O princípio de funcionamento do sistema consiste no monitoramento contínuo da V_{EA} , utilizada como variável de referência para comandar a pulsação da corrente de soldagem entre dois níveis predefinidos: corrente de pico (I_p) e corrente de base (I_b). A lógica de controle foi desenvolvida de modo que a corrente de pico seja aplicada durante o período em que o arame se encontra avançado e em contato com a fonte térmica (poça de fusão e arco elétrico), favorecendo a transferência metálica e a fusão do metal de adição. Durante o recuo do arame, a corrente é reduzida para o nível de base, diminuindo o aporte térmico e preparando o sistema para o ciclo subsequente.

A Figura 6.1 ilustra o princípio de funcionamento do sistema de sincronismo desenvolvido neste trabalho, responsável por sincronizar a pulsação da alimentação de arame com a corrente de soldagem. O ciclo completo é dividido em quatro estágios principais, representados na parte superior da figura, enquanto a parte inferior apresenta os sinais elétricos associados à corrente de soldagem (I) e à tensão eletrodo-arama (V_{EA}).

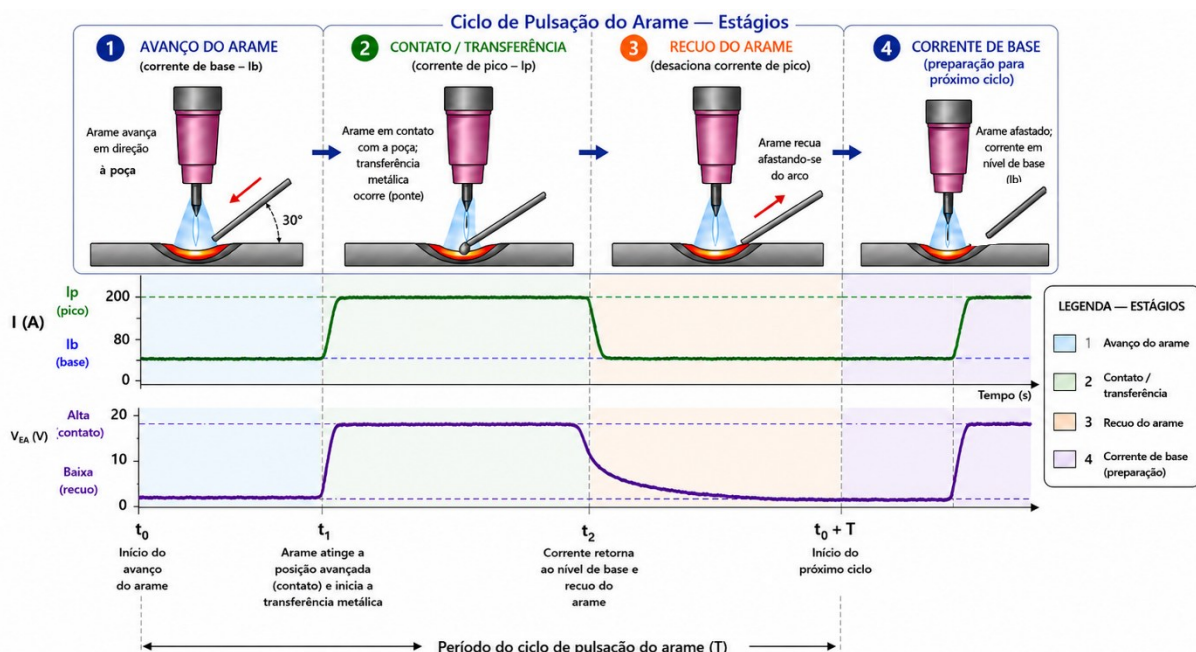


Figura 6.1 - Princípio de funcionamento do sistema de sincronismo: estágios do ciclo de pulsação do arame e pulsação da corrente de soldagem (elaborado pelo autor com o auxílio do ChatGPT (OpenAI, 2026)).

No instante t_0 , inicia-se o movimento de avanço do arame em direção à poça de fusão (Estágio 1). Ao final desse estágio, o sistema identifica a aproximação do arame por meio da elevação abrupta da tensão eletrodo-arame (V_{EA}). A partir dessa detecção, é comandada a transição da corrente de soldagem do nível de base (I_b) para o nível de pico (I_p). A aplicação da corrente de pico tem por objetivo aumentar o aporte térmico disponível, promovendo o aquecimento do arame de adição e da poça de fusão, de modo a favorecer as condições para a transferência metálica. No instante (t_1), o arame está em contato com a poça de fusão (Estágio 2). Nessa condição, a V_{EA} permanece em nível alto, indicando a manutenção do contato entre o arame e a fonte térmica. Simultaneamente, ocorre a transferência metálica, enquanto a corrente de soldagem é mantida no nível de pico (I_p). A permanência da corrente elevada durante esse estágio assegura maior aporte térmico à região de transferência, favorecendo a fusão do material de adição e contribuindo para a estabilidade do processo. Após o período de transferência, no instante (t_2), o arame afasta da fonte térmica (Estágio 3), este movimento é acompanhado pela transição para a corrente de base (I_b). Com o recuo, a V_{EA} retorna ao nível baixo, refletindo o aumento da distância elétrica entre o arame e a fonte térmica. Finalmente, no instante (t_0+T), o arame inicia novamente o movimento de avanço (Estágio 4), preparando o processo para o próximo ciclo de pulsação.

Os gráficos da parte inferior da Figura 6.1, evidenciam a sincronização entre os eventos de pulsação do arame e os sinais elétricos do processo. Observa-se que a I_p é aplicada somente durante o período em que o arame se encontra avançado e ocorre a transferência metálica, enquanto a I_b é mantida durante a fase de recuo do arame. Da mesma forma, a V_{EA} apresenta nível alto durante o contato com a poça de fusão e nível baixo quando o arame se encontra afastado. Dessa forma, demonstra-se a lógica de funcionamento do sistema de sincronismo como concebido, em que a posição do arame é utilizada para comandar a pulsação da corrente de soldagem, promovendo uma atuação coordenada entre alimentação de arame e aporte térmico ao longo de todo o ciclo da operação de deposição.

6.2 Arquitetura do Sistema

6.2.1 Aquisição de Sinais

Conforme metodologia proposta por Silva et al. (2018), a variável de processo adotada para a detecção da posição instantânea do arame de adição foi a tensão eletrodo-arame (V_{EA}), medida entre o eletrodo de tungstênio e o arame de adição. Essa grandeza é sensível à distância entre o arame e a região da fonte térmica (arco de soldagem e poça de fusão): valores baixos de V_{EA} correspondem ao intervalo de recuo do arame, enquanto valores elevados indicam o contato com a fonte térmica. A transição entre esses estados ocorre de forma suficientemente nítida para permitir sua detecção confiável por meio de limiares de tensão previamente configurados, dispensando a utilização de técnicas complexas de filtragem ou algoritmos avançados de processamento de sinais.

A aquisição da tensão eletrodo-arama (V_{EA}) foi realizada por meio de uma placa de aquisição de dados National Instruments® (NI-DAQ), operando sob rotinas desenvolvidas na plataforma LabVIEW®, em conjunto com a placa condicionadora de sinais descrita no Capítulo IV. A taxa de amostragem adotada foi de 10 kHz, valor suficiente para representar adequadamente os fenômenos transitórios do processo e superior às frequências máximas avaliadas experimentalmente. Além da V_{EA} , foram adquiridos simultaneamente os sinais de corrente de soldagem (I) e de tensão do arco (V), permitindo a correlação temporal entre os eventos elétricos do processo e os eventos mecânicos associados à pulsação da alimentação de arame.

6.2.2 Hardware e Integração com a Fonte de Soldagem

A integração entre o sistema de controle de sincronismo e a fonte de soldagem IMC foi realizada por meio do conector CN10, apresentado na Figura 6.2 (à esquerda), acessível no painel traseiro dessa fonte, conectado à placa NI-DAQ pelo adaptador PLCON V3.1. Esse adaptador realiza a interface elétrica entre os sinais lógicos de 3,3 V da placa e os níveis de sinal compatíveis com a fonte.



Figura 6.2 - (Esq.) Conector CN10 da fonte de soldagem (Dir.) modo operacional TIG SINCRO.

No decorrer dos testes iniciais para implementação do sincronismo, constatou-se que o *firmware* original da fonte de soldagem não suportava comutação de corrente em frequências superiores a 5 Hz, impondo uma limitação operacional incompatível com as frequências de pulsação do arame utilizadas no Capítulo V (até 20 Hz). Esta limitação motivou a atualização do *firmware* da fonte de soldagem, que resultou na implementação de um novo modo operacional denominado “TIG SINCRO” por parte do fabricante desse equipamento, mostrado na Figura 6.2 (à direita). Nesse modo, a fonte alterna entre dois níveis de corrente, definidos pelos parâmetros I1 (corrente de pico) e I2 (corrente de base), em resposta ao sinal lógico transmitido pelo bit ED5 do conector CN10: nível alto (1) aciona I_p; nível baixo (0) retorna à I_b. A Tabela 6.1 descreve a função de cada canal do conector utilizado na comunicação.

Tabela 6.1 - Descrição dos pinos de conexão entre a fonte de soldagem e a placa de aquisição/control

Pino (IN/OUT)	Cor do cabo	Conector PLCON V3.1 (CN10)	Função
1	Laranja	7	ED1
2	Marrom	9	GND
3	Amarelo	5	ED3
4	Preto	4	ED4
5	Vermelho	3	ED5
6	Não utilizado	-	NC

6.2.3 Software de Sincronismo

O sistema de controle como implementado opera de forma reativa: a cada amostra adquirida de V_{EA} , o valor medido é comparado com um ou mais limiares de tensão previamente configurados, permitindo determinar o estado lógico do bit ED5 responsável pelo comando da corrente de soldagem. Na busca por maior efetividade de sincronismo, duas estratégias de decisão foram implementadas, correspondendo às duas versões do programa descritas a seguir.

6.2.3.1 Programa V1

A primeira versão do programa de sincronismo realiza a aquisição da tensão eletrodo-arame (V_{EA}) e a compara com dois limiares configuráveis: o Patamar de Subida, que representa a condição em que o arame se aproxima da fonte térmica (Nível de Aproximação), e o Patamar de Descida, que indica o afastamento do arame em relação à fonte térmica (Nível de Afastamento).

Nesse caso, o programa verifica, inicialmente, se a tensão V_{EA} ultrapassa o Nível de Aproximação. Quando isso ocorre, o bit de controle é atribuído ao nível lógico alto (1), acionando a condição configurada na entrada I1 da fonte de soldagem, a corrente de pico (I_p), mostrada na Figura 6.3 (à direita). Em seguida, o sistema permanece em estado de espera até que a tensão caia abaixo do Nível de Afastamento. Nesse momento, o bit de controle é redefinido para nível lógico baixo (0), retornando à condição inicial, correspondente à configuração da entrada I2, a corrente de base (I_b).



Figura 6.3 - (Esq.) Tela de controle dos níveis de tensão - Versão 1
(Dir.) Interface de ajuste dos parâmetros I1 e I2 no menu TIG SINCRO da fonte de soldagem.

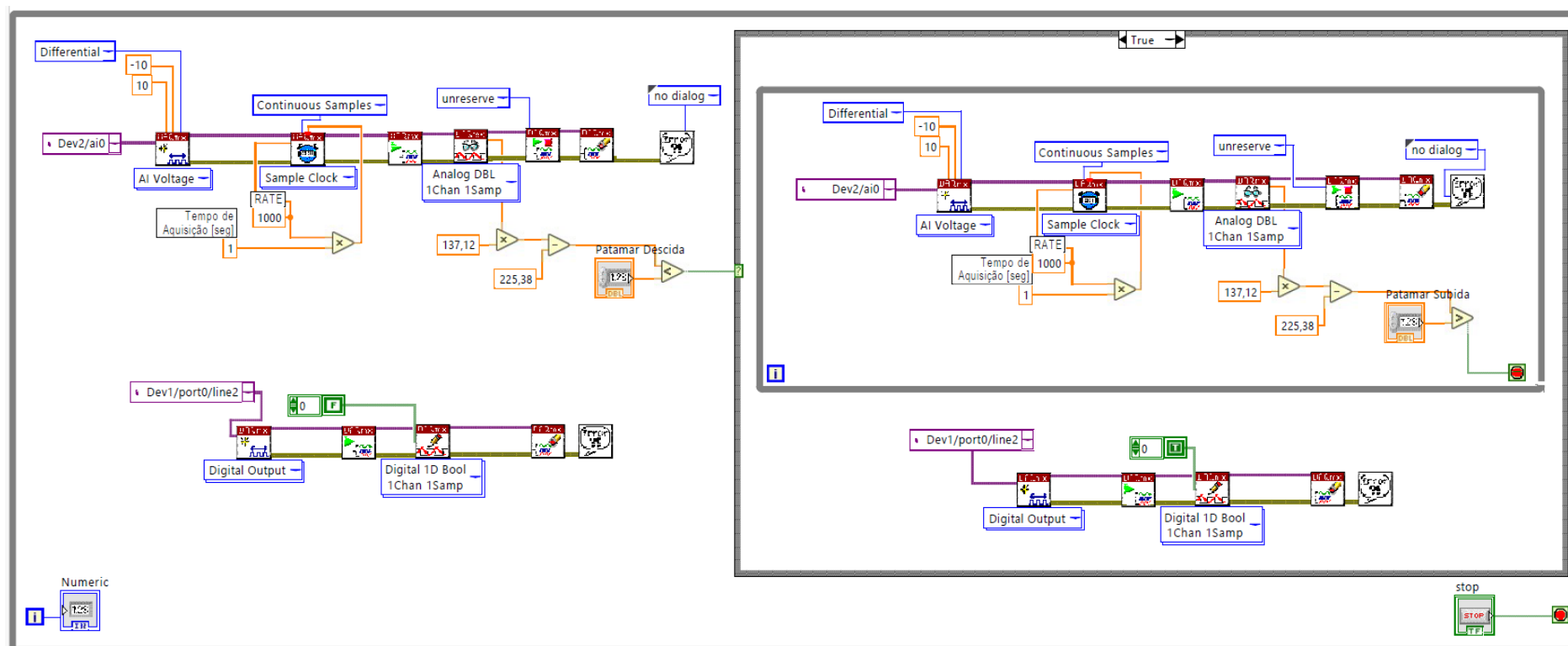


Figura 6.4 - Diagrama de programação do sincronismo – Versão 1.

Essa versão do controle, portanto, realiza monitoramento dinâmico da distância entre o arame e a fonte térmica (arco de soldagem e poça de fusão), promovendo a alternância automática entre os valores de corrente de pico e de base em função da posição instantânea do arame. Tal controle permite maior precisão no ajuste do processo de soldagem, otimizando a resposta do sistema às variações de tensão detectadas. A Figura 6.3 (à esquerda) apresenta a interface utilizada para a configuração dos níveis de tensão de referência e a Figura 6.4, ilustrando a lógica de programação desenvolvida.

6.2.3.2 Programa V2

Na primeira versão do programa de sincronismo, a comutação entre as correntes de pico e de base é comandada pelos eventos de contato e afastamento do arame em relação à poça de fusão. Embora essa estratégia permitisse sincronizar a corrente com a interação arame-poça, a duração dos patamares de pico e de base passava a depender da dinâmica desses eventos, que não ocorre necessariamente de forma regular ao longo dos ciclos. Como consequência, os tempos efetivos de permanência em cada nível de corrente podem ser distintos, provocando variações na corrente média e, conseqüentemente, no aporte térmico entre diferentes condições experimentais. Diante dessa limitação, foi desenvolvida uma segunda estratégia de controle, na qual o sincronismo com os eventos de contato foi mantido, mas com uma lógica capaz de controlar o tempo de atuação da corrente de pico, preservando a corrente média estabelecida. Essa modificação permitiu realizar comparações experimentais sob condições térmicas mais equivalentes, isolando os efeitos associados ao sincronismo entre a pulsação do arame e a corrente de soldagem.

Nesta segunda versão do programa de sincronismo foi estabelecido um único nível de tensão de referência (V_{EA}) para detectar a aproximação do arame em relação à região da fonte térmica (arco e poça de fusão). Identificado esse evento, aplica-se a corrente de pico (I_p) durante um intervalo de tempo fixo, determinado em função da frequência de pulsação do arame, especificamente, meio ciclo da frequência configurada, convertido para milissegundos. Diferentemente da Versão 1, a transição para a corrente de base ocorre automaticamente após o tempo pré-configurado. Em seguida, o sistema retorna ao estado de espera até que a tensão volte a atingir o patamar de referência, reiniciando o ciclo.

Por empregar tempo fixo para a aplicação da corrente de pico, a Versão 2 apresentou valores médios de corrente mais estáveis e mais próximos dos parâmetros utilizados nos ensaios de referência. Conforme apresenta a Figura 6.5, na primeira etapa do programa realiza-se a aquisição da tensão V_{EA} , e o estado do bit ED5 é inicialmente definido conforme o nível configurado em I2 da fonte (corrente de base I_b). Durante a execução, o programa monitora a tensão adquirida; quando essa tensão ultrapassa 7 V (patamar estabelecido para caracterizar o ponto de contato entre o arame e o arco) o bit ED5 passa a nível alto, acionando a função associada à entrada I1 da fonte. A corrente permanece no patamar de pico pelo intervalo de meio ciclo; finalizado esse intervalo, o bit é redefinido para o nível ajustado em I2 e reinicia-se a leitura, repetindo o ciclo de controle.

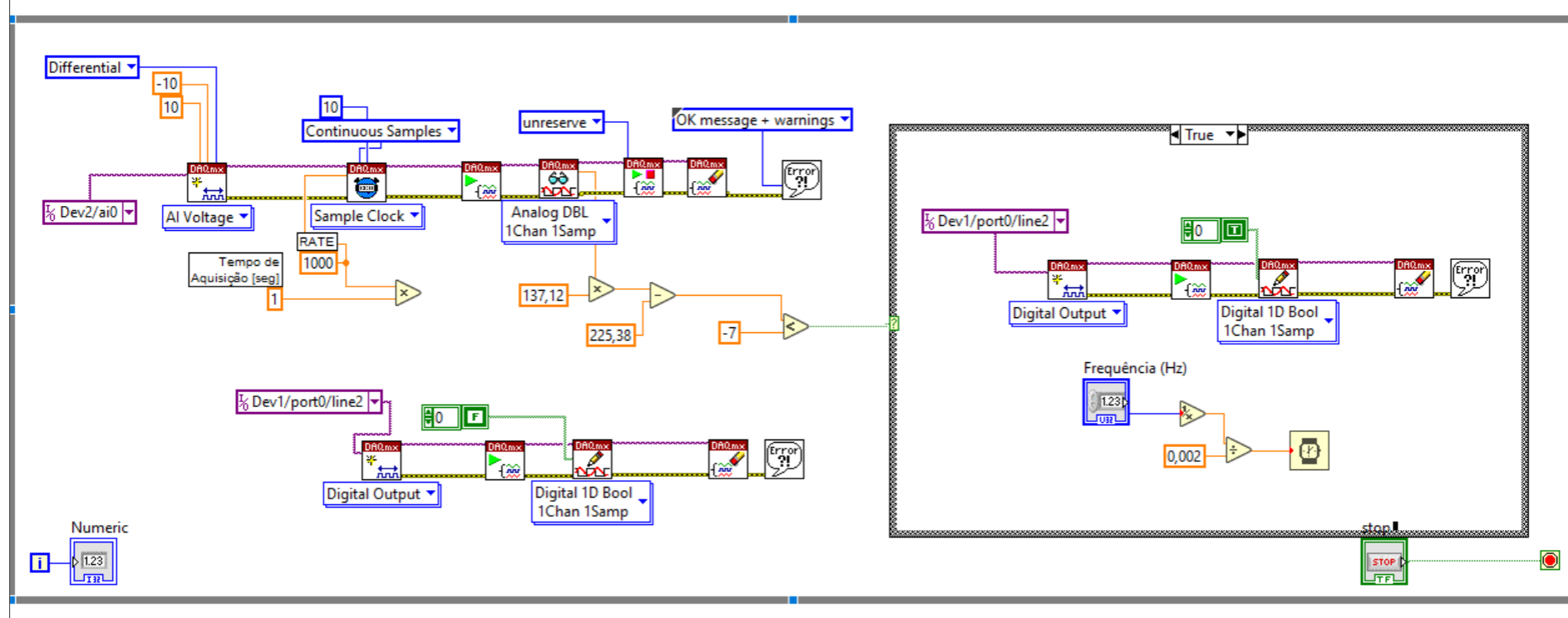


Figura 6.5 - Diagrama de programação do sincronismo – Versão 2.

6.3 Materiais e Métodos

6.3.1 Montagem Geral

A Figura 6.6 apresenta a bancada experimental utilizada nos ensaios de verificação do sincronismo entre a pulsação da alimentação de arame e a pulsação da corrente de soldagem. O sistema foi montado sobre uma mesa de coordenadas XYZ, responsável pelo deslocamento da tocha durante a execução dos cordões de solda. O controle dos movimentos da mesa e a aquisição dos sinais experimentais foram realizados por meio de computadores dedicados.

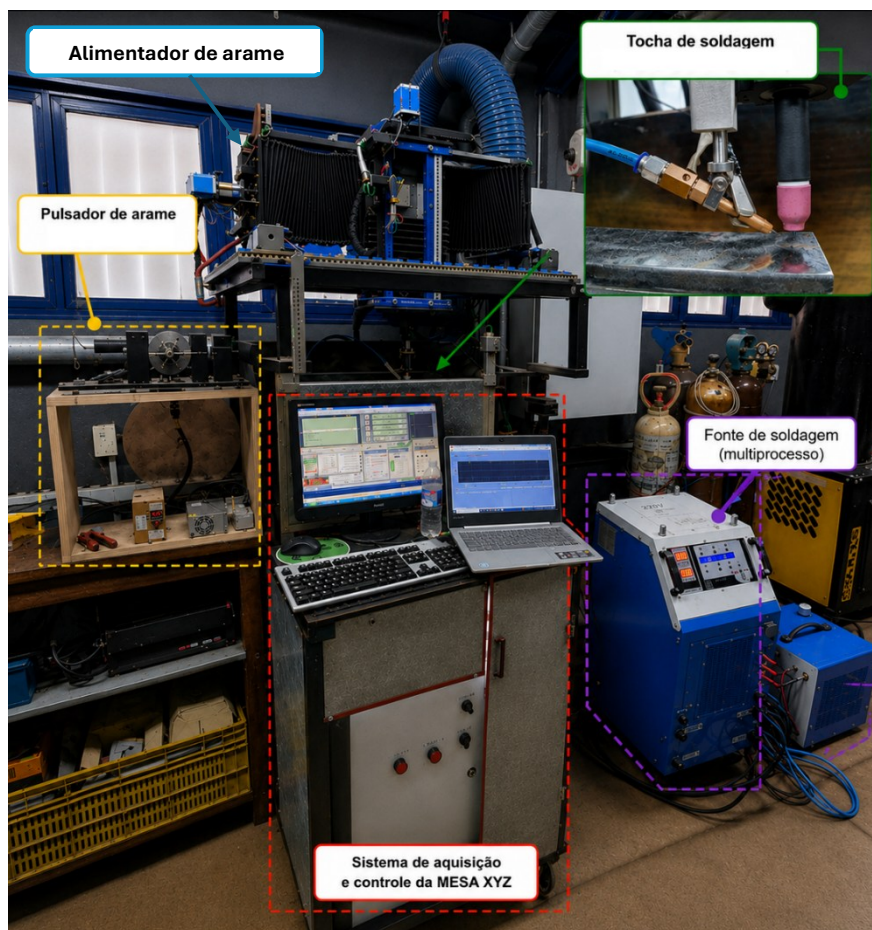


Figura 6.6 - Bancada experimental utilizada (O alimentador de arame está posicionado atrás da mesa de coordenadas XYZ).

A pulsação da alimentação de arame foi promovida pelo dispositivo pulsador desenvolvido neste trabalho, descrito e caracterizado no Capítulo IV. Foi utilizada uma tocha TIG automática, posicionada sobre a região de soldagem da mesa XYZ, e por um sistema de alimentação de arame disposto de forma a permitir a introdução do metal de adição na poça de fusão.

A fonte de soldagem utilizada foi uma IMC DigiPlus A7®, operando em modo TIG pulsado, associada a uma unidade de refrigeração (*chiller*) para o resfriamento da tocha. Os sinais de corrente de soldagem, tensão do arco e tensão eletrodo-arame foram adquiridos simultaneamente por meio de uma placa de aquisição de dados National Instruments® (NI-DAQ) e de circuitos de condicionamento de sinais, permitindo a correlação temporal entre os eventos elétricos do processo e os eventos mecânicos associados à pulsação do arame.

Os ensaios de validação do sistema de sincronismo foram realizados por meio da deposição de simples cordões de solda sobre chapa, na posição plana, sendo adotado um comprimento de 100 mm para cada cordão produzido. As chapas de teste foram confeccionadas em aço carbono ABNT 1020, com dimensões de 200 × 100 × 6,35 mm. Como metal de adição empregou-se arame de arame de aço inoxidável AWS 308L de diâmetro 1,0 mm. Os parâmetros mantidos constantes ao longo de todos os ensaios estão listados na Tabela 6.2.

Tabela 6.2 - Parâmetros constantes mantidos ao longo de todos os ensaios de validação do sistema de sincronismo.

Parâmetro	Valor
Distância eletrodo-peça	3 mm
Distância bocal-peça	10 mm
Distância ponta do eletrodo-bocal	7 mm
Distância arame-eletrodo	3,5 mm
Velocidade de soldagem	10 cm/min
Ângulo de alimentação do arame	30°
Vazão de gás de proteção	13 L/min
Tipo de gás de proteção	Argônio

O envelope de trabalho determinado no Capítulo V ($V_a \times I$ para $V_s = 10$ cm/min) foi utilizado como referência para a seleção das condições experimentais, sendo a condição central do envelope ($V_a = 1,0$ m/min e $I = 160$ A) adotada como ponto de partida para os experimentos com as duas versões de programa para controle do sincronismo.

6.3.2 Planejamento Experimento 1 - Avaliação Exploratória por Grupos (A a F)

O primeiro conjunto de ensaios, de caráter exploratório, foi conduzido com o objetivo de avaliar a viabilidade operacional do sistema de sincronismo em diferentes regiões do envelope de trabalho do processo, bem como investigar os efeitos gerais da pulsação da corrente de soldagem sincronizada com pulsação da alimentação do arame de adição sobre a estabilidade operacional e a transferência metálica. O planejamento experimental contemplou três regiões representativas do envelope de trabalho: uma condição central ($V_a = 1,0$ m/min; $I = 160$ A), adotada como referência principal, e duas condições limites, a primeira com $I = 120$ A e $V_a = 1,0$ m/min, e a segunda com $V_a = 2,2$ m/min e $I = 160$ A. Nessas duas últimas condições, a capacidade térmica da poça de fusão e arco mostrou-se anteriormente insuficiente para promover a fusão adequada do arame sob corrente constante, resultando na ocorrência de *wire stubbing* e inviabilizando a deposição estável do cordão de solda. Assim, a introdução da pulsação de corrente sincronizada com a alimentação do arame foi investigada como uma estratégia para ampliar o envelope de trabalho do processo e viabilizar a soldagem nessas regiões.

Os ensaios também foram utilizados para avaliar diferentes combinações de corrente de pico (I_p) e corrente de base (I_b), bem como as diferentes estratégias e versões do programa de sincronismo. O Grupo B foi definido com uma menor diferença entre I_p e I_b em relação ao Grupo A,

mantendo-se inalterados os demais parâmetros operacionais, enquanto o Grupo E foi concebido com uma estratégia de sincronismo invertido, na qual o avanço do arame foi sincronizado com a corrente de base (I_b) e o recuo do arame com a corrente de pico (I_p). Essa condição foi incluída com o objetivo de avaliar a influência da relação entre a posição instantânea do arame e o aporte térmico disponibilizado pela fonte de soldagem. O Grupo F reproduziu as condições do Grupo A com o Programa V2, possibilitando comparação direta entre as duas estratégias de controle.

Para cada condição experimental, foram ainda avaliadas duas amplitudes de pulsação do arame, nominalmente denominadas de 6 mm e 10 mm, correspondentes às amplitudes experimentais de 5,95 mm e 9,85 mm, respectivamente, determinadas durante a etapa de caracterização do dispositivo apresentada no Capítulo IV. Adicionalmente, foram investigadas duas frequências de pulsação do arame (2 Hz e 15 Hz). Como a estratégia de sincronismo estabelecia uma correspondência direta entre os ciclos de pulsação do arame e da corrente de soldagem, a frequência de pulsação da corrente coincide com a frequência de pulsação do arame em todos os ensaios sincronizados realizados. Ensaios sem pulsação de arame ($A = 0$) foram também executados, com a corrente pulsada nas mesmas frequências como referência para avaliação isolada dos efeitos da pulsação de corrente. A Tabela 6.3 apresenta o planejamento experimental que foi seguido.

Tabela 6.3 - Planejamento dos ensaios de validação exploratória do sincronismo - Experimento 1 (Grupos A a F). I_p : corrente de pico; I_b : corrente de base; V_a : velocidade de alimentação; A : amplitude de pulsação do arame; F : frequência de pulsação; Prog.: versão do programa de sincronismo.

Grupo	I_p (A)	I_b (A)	V_a (m/min)	A (mm)	F (Hz)	Prog.	Descrição
A	200	120	1,0	6,00 - 10,00	2 - 15	V1	Ponto central (referência principal)
B	180	140	1,0	6,00 - 10,00	2 - 15	V1	Menor diferença I_p - I_b
C	200	120	2,2	6,00 - 10,00	2 - 15	V1	V_a elevada (limite superior do envelope)
D	160	80	1,0	6,00 - 10,00	2 - 15	V1	$I = 120$ A (limite inferior do envelope)
E	80	160	1,0	6,00 - 10,00	2 - 15	V1	Sincronismo invertido (I_p no recuo)
F	200	120	1,0	6,00 - 10,00	2 - 15	V2	Idem A - validação do Programa V2

Como houve variação da corrente média na maioria das condições avaliadas no Experimento 1, não foi possível distinguir os efeitos exclusivamente associados à pulsação da alimentação de arame daqueles decorrentes da interação entre o movimento do arame e o aporte térmico do processo. Dessa forma, o Experimento 2 foi planejado para avaliar, de forma isolada e combinada, os efeitos do modo de corrente (pulsado ou constante) e dos parâmetros de pulsação do arame, bem como validar a estratégia de sincronismo proposta nesta tese, utilizando o Programa V2 de sincronismo e por meio de filmagens em alta velocidade.

6.3.3 Planejamento Experimento 2 - Avaliação do sincronismo corrente-aramé

O segundo conjunto de ensaios foi projetado para isolar e avaliar as contribuições individuais e combinadas do modo de corrente (constante versus pulsado sincronizado) e dos parâmetros de pulsação da alimentação de arame de adição sobre a geometria dos cordões. Para isso, foi adotado um planejamento experimental em blocos, composto por 11 testes organizados em quatro blocos sobrepostos, permitindo a análise isolada e combinada das variáveis de interesse a partir de uma condição de referência comum ($V_a = 1,0$ m/min; $I = 160$ A; $I_p = 200$ A; $I_b = 120$ A; $T_p/T_b = 50\%$). A Tabela 6.4 apresenta o planejamento para este experimento em blocos.

Tabela 6.4 - Planejamento experimental para validação sistemática – Experimento 2 (11 testes em 4 blocos). F1: frequência da corrente pulsada; A: amplitude de pulsação do arame; F2: frequência de pulsação do arame.

Teste	Modo da corrente	I_p/I_b (A)	F1 corrente (Hz)	A arame (mm)	F2 arame (Hz)	Bloco(s)
1	Constante	160	-	-	-	1 e 2
2	Pulsado	200-120	2	-	-	1 e 3
3	Pulsado	200-120	15	-	-	1 e 3
4	Constante	160	-	5,95	2	2 e 4
5	Constante	160	-	5,95	15	2 e 4
6	Constante	160	-	9,85	2	2 e 4
7	Constante	160	-	9,85	15	2 e 4
8	Pulsado sincronizado	200-120	2	5,95	2	3 e 4
9	Pulsado sincronizado	200-120	15	5,95	15	3 e 4
10	Pulsado sincronizado	200-120	2	9,85	2	3 e 4
11	Pulsado sincronizado	200-120	15	9,85	15	3 e 4

A organização dos ensaios em quatro blocos, é descrita a seguir:

- Bloco 1 (testes 1, 2 e 3) – avaliação do efeito do modo de corrente de soldagem (constante × pulsada, em 2 Hz e 15 Hz) sobre a geometria do cordão, sem pulsação do arame. O teste 1 corresponde à corrente constante; os testes 2 e 3 correspondem à corrente pulsada em 2 e 15 Hz respectivamente.
- Bloco 2 (testes 1, 4 a 7) – avaliação dos efeitos da pulsação da alimentação de arame, em corrente constante. São investigados dois níveis de frequência (2 e 15 Hz) e dois níveis de amplitude (5,95 e 9,85 mm) para o movimento alternado do arame.
- Bloco 3 (testes 2, 3, 8 a 11) – avaliação dos efeitos da pulsação da alimentação de arame em corrente pulsada sincronizada, com os mesmos parâmetros de pulsação do arame adotados no Bloco 2.
- Bloco 4 (testes 4 a 7 e 8 a 11) – comparação dos modos de corrente (constante × pulsada sincronizada) para as mesmas combinações de parâmetros de pulsação do arame (2 e 15 Hz; 5,95 e 9,85 mm).

6.4 Resultados e Discussão

6.4.1 Resultados e Discussão - Experimento 1

A análise dos resultados do Experimento 1 é estruturada a partir dos fenômenos observados e não pela sequência cronológica dos grupos experimentais. Assim, a discussão inicia-se pela validação do sistema de sincronismo, verificando a capacidade do sinal de tensão eletrodo-arama (V_{EA}) em identificar de forma confiável os eventos característicos do ciclo de pulsação da alimentação de arame. Em seguida, são analisados os efeitos do sincronismo entre a corrente de soldagem e pulsação de alimentação do arame de adição, estabelecendo as bases para a interpretação dos resultados geométricos. Por fim, são discutidas as implicações do sincronismo sobre a estabilidade do processo e a ampliação do envelope de trabalho, evidenciando as contribuições da estratégia desenvolvida para a viabilização de condições anteriormente limitadas pela ocorrência de *wire stubbing*.

6.4.1.1 Validação do Programa de Sincronismo

A premissa operacional do sistema de sincronismo baseia-se na capacidade de identificar, em tempo real e a partir do sinal de tensão eletrodo-arama (V_{EA}), os quatro estágios característicos do ciclo de pulsação da alimentação de arame: recuo, avanço e contato, manutenção da ponte metálica e ruptura. A análise dos oscilogramas do Experimento 1 confirmou que, para as frequências investigadas (2 a 15 Hz), o sinal de V_{EA} apresenta sensibilidade adequada para a detecção desses eventos, uma vez que as transições associadas ao contato e à ruptura da ponte metálica manifestam-se por meio de variações bem definidas do sinal, conforme ilustrado, a título de exemplo, pelos oscilogramas dos ensaios A5 e A6 (Figura 6.7).

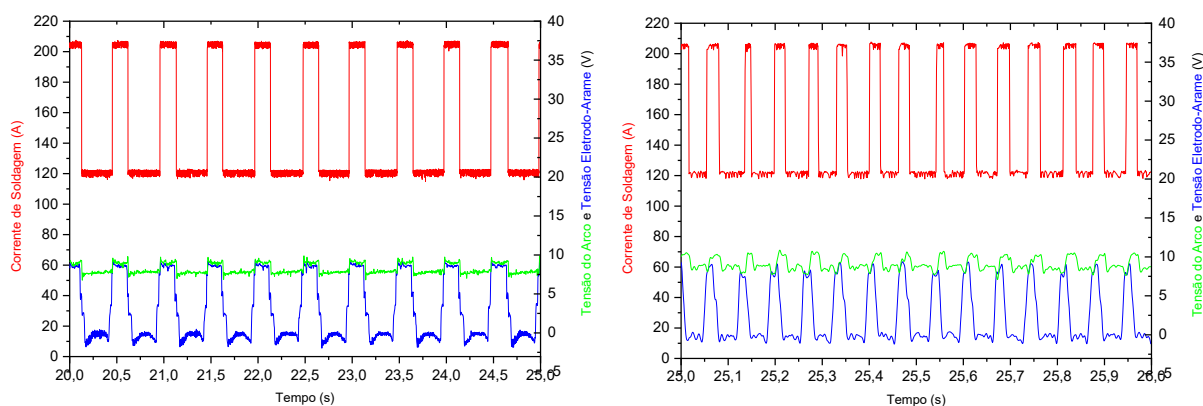


Figura 6.7 - Oscilogramas dos ensaios A5 (esq.) e A6 (dir.), ambos com corrente sincronizada com alimentação pulsada, A = 10 mm, $V_a = 1,0$ m/min e Programa V1, diferindo apenas quanto à frequência de pulsação: $F = 2$ Hz (A5) e $F = 15$ Hz (A6).

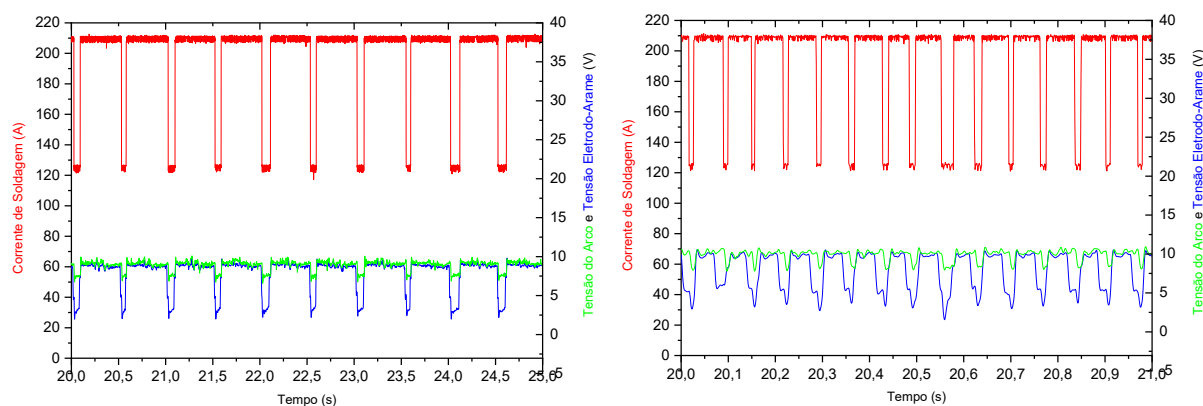


Figura 6.8 - Oscilogramas dos ensaios C3 (esq.) e C4 (dir.), ambos com corrente sincronizada com alimentação pulsada, $A = 6$ mm, $V_a = 2,2$ m/min e Programa V1, diferindo apenas quanto à frequência de pulsação: $F = 2$ Hz (C3) e $F = 15$ Hz (C4).

Tabela 6.5 - Corrente média de soldagem (I_m) medida em cada ensaio do Experimento 1. Ensaios com asterisco (*) utilizaram o Programa V2; demais utilizam o Programa V1. A: amplitude de pulsação; F: frequência de pulsação

Ensaio	V_a (m/min)	I_p (A)	I_b (A)	A (mm)	F (Hz)	I_m (A)
A1	1,0	200	120	0	2	160,45
A2	1,0	200	120	0	15	161,77
A3	1,0	200	120	5,95	2	147,98
A4	1,0	200	120	5,95	15	155,58
A5	1,0	200	120	9,85	2	148,51
A6	1,0	200	120	9,85	15	149,27
B1	1,0	180	140	0	2	159,43
B2	1,0	180	140	0	15	160,19
B3	1,0	180	140	5,95	2	156,00
B4	1,0	180	140	5,95	15	158,80
B5	1,0	180	140	9,85	2	153,20
B6	1,0	180	140	9,85	15	155,85
C1	2,2	200	120	0	2	168,77
C2	2,2	200	120	0	15	169,40
C3	2,2	200	120	5,95	2	196,79
C4	2,2	200	120	5,95	15	193,53
C5	2,2	200	120	9,85	2	169,77
C6	2,2	200	120	9,85	15	167,02
D1	1,0	160	80	0	2	123,48
D2	1,0	160	80	0	15	124,46
D3	1,0	160	80	5,95	2	106,36
D4	1,0	160	80	5,95	15	121,79
D5	1,0	160	80	9,85	2	104,58
D6	1,0	160	80	9,85	15	111,60
E1	1,0	80	160	5,95	2	119,63
E2	1,0	80	160	5,95	15	107,89
E3	1,0	80	160	9,85	2	145,07
E4	1,0	80	160	9,85	15	138,62
F1*	1,0	200	120	5,95	2	161,34
F2*	1,0	200	120	5,95	15	161,45
F3*	1,0	200	120	9,85	2	160,24
F4*	1,0	200	120	9,85	15	160,22

Entretanto, nas condições de maior velocidade de alimentação de arame, correspondentes ao Grupo C ($V_a = 2,2$ m/min), foram observadas oscilações da V_{EA} próximas ao limiar utilizado para o controle do sincronismo, conforme ilustrado na Figura 6.8, que apresenta os oscilogramas dos ensaios C3 e C4. Esse comportamento decorre de dois fatores combinados: (1) em alta V_a , o arame permanece em contato com a poça por fração maior do ciclo, prolongando a manutenção da V_{EA} acima do limiar de ativação; (2) o menor deslocamento do arame durante o recuo mantém o eletrodo próximo à fonte térmica, impedindo que a V_{EA} caia abaixo do limiar de desativação. Como consequência, o Programa V1 tende a prolongar a permanência da corrente no patamar de pico (I_p), elevando a corrente média acima do valor nominal, efeito observado nos ensaios C3 ($I_m = 196,8$ A) e C4 ($I_m = 193,5$ A), cujas correntes médias ficaram aproximadamente 28 A acima dos ensaios sem pulsação de arame do mesmo grupo (C1: $I_m = 168,8$ A; C2: $I_m = 169,4$ A). A Tabela 6.5 apresenta os valores de I_m medidos nos 32 ensaios realizados e constitui o primeiro resultado a ser analisado, pois condiciona todas as comparações geométricas subsequentes.

Para contornar essa limitação, o Programa V2, adotado no Grupo F, substituiu o critério de desativação baseado em limiar por um intervalo fixo de corrente de pico, correspondente à metade do período da frequência de pulsação configurada. Essa estratégia eliminou a influência das oscilações da V_{EA} sobre o tempo de permanência em I_p , resultando em correntes médias de 160,2 a 161,5 A em todos os ensaios do Grupo F, mais próximas do valor médio alvo e com menor variabilidade do que os ensaios equivalentes do Grupo A, que utilizou o Programa V1 sob as mesmas condições de V_a e amplitude.

A latência de comutação foi determinada pela diferença temporal entre o instante em que a tensão eletrodo-aramé (V_{EA}) ultrapassa o limiar de acionamento (Seção 6.2.3.2) e o início da transição da corrente de soldagem de I_b para I_p . Essa análise foi realizada sobre ciclos consecutivos, sendo a latência representada pelo maior intervalo obtido dentre os ciclos analisados. A Figura 6.9 apresenta o maior valor de latência de comutação observado no conjunto de ensaios, de aproximadamente 10 ms, registrado no ensaio F4 (corrente sincronizada com alimentação pulsada; $A = 6$ mm; $F = 15$ Hz; $V_a = 1,0$ m/min; Programa V2). A análise restringiu-se ao terço central do oscilograma, correspondente ao regime permanente de operação, desconsiderando as regiões inicial e final do cordão, de modo que a latência apresentada corresponde ao pior caso observado em condições estáveis de operação. Ainda assim, o sistema apresentou tempo de resposta compatível com a dinâmica do processo, garantindo a comutação sincronizada entre os patamares de corrente.

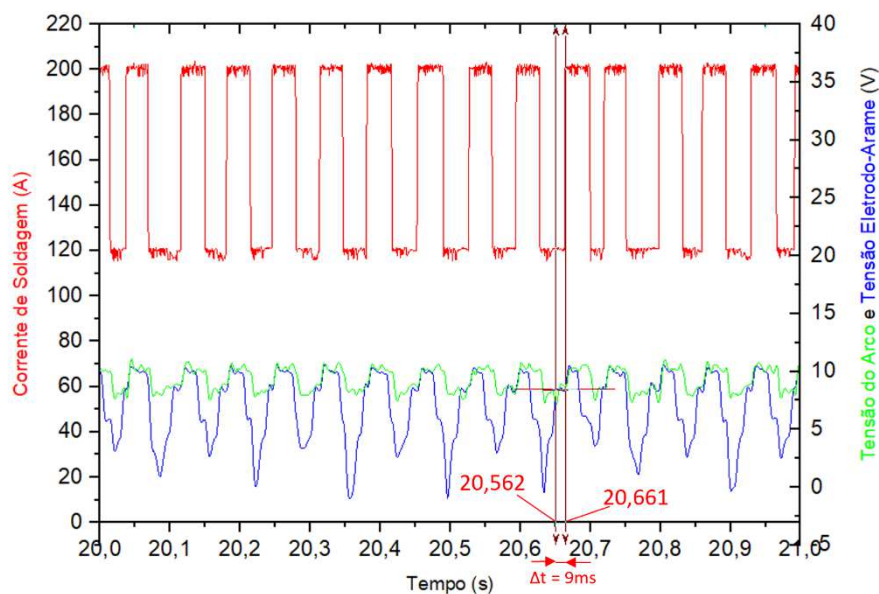


Figura 6.9 - Medição da latência de comutação (aproximadamente 10 ms) observada no ensaio F2 (corrente sincronizada com alimentação pulsada; A = 6 mm; F = 15 Hz; V_a = 1,0 m/min; Prog. V2).

6.4.1.2 Variação da Corrente Média

Para a correta interpretação dos resultados geométricos deste experimento, torna-se necessário analisar inicialmente a variação da corrente média de soldagem (I_m) observada nos ensaios realizados com o Programa V1, apresentada na Tabela 6.5. A variação de I_m verificada nos ensaios com Programa V1 é uma consequência direta de sua lógica de controle: o *duty cycle* da corrente de pico (I_p), que corresponde ao intervalo de tempo em que se aplica esse nível de corrente, é determinado dinamicamente pela posição instantânea do arame, e não por um parâmetro temporal fixo. De acordo com a análise das correntes médias de soldagem apresentadas na Figura 6.10, observa-se que para o Grupo A, por exemplo, a I_m cai de aproximadamente 161 A nos ensaios sem pulsação de arame (A1: 160,5 A; A2: 161,8 A) para valores entre 148 e 156 A quando a pulsação é introduzida (A3-A6), redução de até 8% atribuível à diminuição do intervalo de tempo em que o arame está em fase de avanço (I_p ativo). No Grupo C (V_a = 2,2 m/min), o efeito é oposto para amplitude pequena: C3 e C4 registram I_m de 196,8 A e 193,5 A, respectivamente, pois o arame permanece próximo à fonte térmica por um intervalo de tempo maior do ciclo, ampliando o *duty cycle* de I_p .

Como a geometria do cordão de solda é fortemente influenciada pelo aporte térmico imposto ao processo, variações da corrente média de soldagem (I_m) tendem a impactar diretamente parâmetros como largura, reforço, penetração e diluição. Dessa forma, as diferenças geométricas observadas entre os ensaios realizados com o Programa V1 podem estar associadas, em maior ou menor grau, às variações de I_m , e não exclusivamente aos efeitos da frequência ou da amplitude de pulsação do arame. Essa forte interação entre os parâmetros dificulta a avaliação isolada dos efeitos da pulsação sobre a geometria do cordão, limitando as comparações diretas entre grupos experimentais.

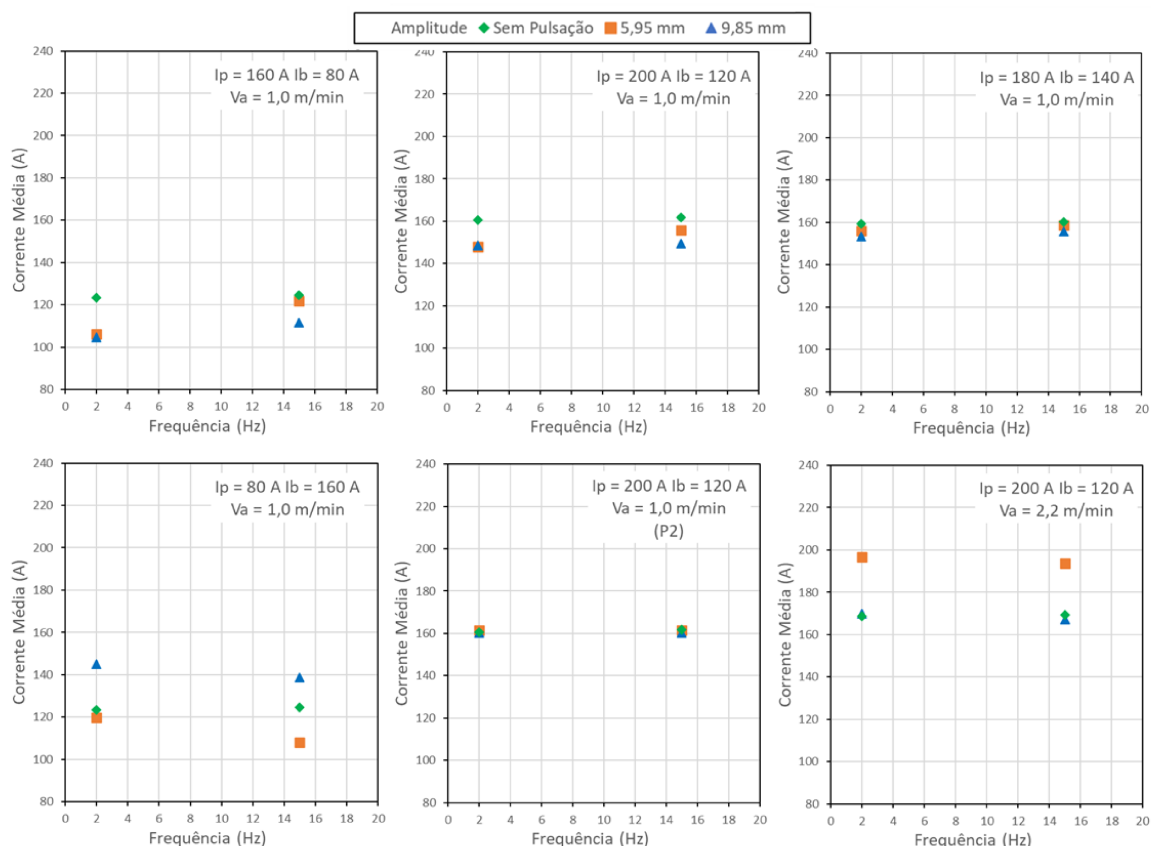


Figura 6.10 - Correntes médias de soldagem (I_m) obtidas nos ensaios com sincronismo

A única exceção a essa limitação é o Grupo F (Programa V2), no qual I_m teve variação inferior a 1% em todos os ensaios (para todas as combinações de frequência e amplitude). Isso ocorre porque o Programa V2 aplica I_p por um intervalo temporal fixo (metade do período de pulsação), desacoplando o *duty cycle* das variações do ciclo real do arame. O Grupo F constitui, portanto, o único conjunto de ensaios capaz de isolar os efeitos geométricos da pulsação sem interação com a I_m , e será utilizado como referência na seção seguinte.

6.4.1.3 Efeitos dos Parâmetros de Pulsação sobre a Geometria do Cordão

A Tabela 6.6 apresenta os resultados geométricos obtidos para os cordões produzidos em cada condição experimental, incluindo largura, reforço, penetração e diluição. Os resultados geométricos são apresentados na forma de média e desvio-padrão, calculados a partir de três seções transversais (mais ao início, no meio e mais ao fim) extraídas de cada cordão.

A análise isolada dos efeitos dos parâmetros de pulsação sobre a geometria dos cordões é limitada nas condições com o Programa V1, uma vez que sua lógica de sincronismo resultou em diferentes correntes médias e, conseqüentemente, em diferentes aportes térmicos. Assim, as variações geométricas observadas não podem ser atribuídas exclusivamente à frequência e à amplitude de pulsação. Por essa razão, essa análise será realizada com base no Grupo F, no qual

foi empregado o Programa V2, desenvolvido para manter a corrente média e, portanto, condições equivalentes de aporte térmico entre os ensaios.

Tabela 6.6 - Corrente de soldagem média e aspectos geométricos médios dos cordões de solda nos ensaios com sincronismo (média $\pm$ desvio-padrão); Ensaios com asterisco (*) utilizaram o Programa V2; demais utilizam o Programa V1.

Ensaio	Largura (mm)	Reforço (mm)	Penetração (mm)	Diluição
A1	7,05 $\pm$ 0,28	2,10 $\pm$ 0,06	1,18 $\pm$ 0,01	0,39 $\pm$ 0,00
A2	6,20 $\pm$ 0,04	2,32 $\pm$ 0,17	1,17 $\pm$ 0,06	0,31 $\pm$ 0,00
A3	7,36 $\pm$ 0,14	2,01 $\pm$ 0,04	1,42 $\pm$ 0,09	0,35 $\pm$ 0,02
A4	6,78 $\pm$ 0,05	2,10 $\pm$ 0,04	0,72 $\pm$ 0,01	0,27 $\pm$ 0,02
A5	6,91 $\pm$ 0,15	1,97 $\pm$ 0,02	1,35 $\pm$ 0,12	0,36 $\pm$ 0,01
A6	5,85 $\pm$ 0,71	2,38 $\pm$ 0,03	1,52 $\pm$ 0,15	0,37 $\pm$ 0,01
B1	8,93 $\pm$ 0,02	1,75 $\pm$ 0,05	0,95 $\pm$ 0,07	0,29 $\pm$ 0,02
B2	8,34 $\pm$ 0,45	1,55 $\pm$ 0,32	0,70 $\pm$ 0,02	0,27 $\pm$ 0,02
B3	7,16 $\pm$ 0,09	2,06 $\pm$ 0,03	1,45 $\pm$ 0,07	0,37 $\pm$ 0,02
B4	6,64 $\pm$ 0,53	2,04 $\pm$ 0,21	0,65 $\pm$ 0,06	0,26 $\pm$ 0,04
B5	6,14 $\pm$ 0,20	2,31 $\pm$ 0,20	1,13 $\pm$ 0,24	0,26 $\pm$ 0,01
B6	5,05 $\pm$ 0,60	2,53 $\pm$ 0,06	1,33 $\pm$ 0,33	0,31 $\pm$ 0,08
C1	8,37 $\pm$ 0,09	3,44 $\pm$ 0,16	0,35 $\pm$ 0,00	0,07 $\pm$ 0,00
C2	8,59 $\pm$ 0,01	3,22 $\pm$ 0,05	0,38 $\pm$ 0,04	0,06 $\pm$ 0,01
C3	8,97 $\pm$ 0,10	3,27 $\pm$ 0,26	1,22 $\pm$ 0,08	0,28 $\pm$ 0,01
C4	9,00 $\pm$ 0,11	3,57 $\pm$ 0,30	0,99 $\pm$ 0,02	0,17 $\pm$ 0,01
C5	6,41 $\pm$ 0,02	3,67 $\pm$ 0,18	1,04 $\pm$ 0,11	0,19 $\pm$ 0,01
C6	7,15 $\pm$ 0,03	5,38 $\pm$ 0,05	0,69 $\pm$ 0,01	0,10 $\pm$ 0,03
D1	5,74 $\pm$ 0,12	1,99 $\pm$ 0,03	0,73 $\pm$ 0,02	0,22 $\pm$ 0,02
D2	6,44 $\pm$ 0,20	2,24 $\pm$ 0,08	0,74 $\pm$ 0,02	0,17 $\pm$ 0,02
D3	3,50 $\pm$ 0,57	2,65 $\pm$ 0,32	0,37 $\pm$ 0,06	0,09 $\pm$ 0,02
D4	4,31 $\pm$ 0,41	2,76 $\pm$ 0,07	0,28 $\pm$ 0,02	0,07 $\pm$ 0,01
D5	4,43 $\pm$ 0,29	2,63 $\pm$ 0,09	0,73 $\pm$ 0,05	0,17 $\pm$ 0,03
D6	3,54 $\pm$ 0,82	2,91 $\pm$ 0,34	0,52 $\pm$ 0,31	0,09 $\pm$ 0,07
E1	5,51 $\pm$ 0,15	2,61 $\pm$ 0,15	0,81 $\pm$ 0,09	0,24 $\pm$ 0,05
E2	3,80 $\pm$ 0,05	3,07 $\pm$ 0,42	0,52 $\pm$ 0,10	0,09 $\pm$ 0,04
E3	4,70 $\pm$ 0,09	2,58 $\pm$ 0,02	1,70 $\pm$ 0,08	0,33 $\pm$ 0,00
E4	4,61 $\pm$ 0,20	2,66 $\pm$ 0,01	1,41 $\pm$ 0,38	0,28 $\pm$ 0,05
F1*	8,23 $\pm$ 0,13	1,97 $\pm$ 0,01	0,84 $\pm$ 0,10	0,30 $\pm$ 0,02
F2*	6,57 $\pm$ 0,16	1,98 $\pm$ 0,03	0,70 $\pm$ 0,03	0,24 $\pm$ 0,01
F3*	7,95 $\pm$ 0,01	1,99 $\pm$ 0,02	1,06 $\pm$ 0,01	0,32 $\pm$ 0,01
F4*	6,33 $\pm$ 0,35	2,41 $\pm$ 0,18	0,72 $\pm$ 0,22	0,24 $\pm$ 0,04

A análise dos resultados do Grupo F (Figura 6.11 e Tabela 6.7) demonstra que o efeito da frequência de pulsação é o mais expressivo. O aumento de 2 Hz para 15 Hz reduziu a largura em aproximadamente 20% (F1: 8,23 mm $\rightarrow$ F2: 6,57 mm para A ~ 6 mm; F3: 7,95 mm $\rightarrow$ F4: 6,33 mm para A ~ 10 mm), a penetração entre 17% e 32%, e a diluição entre 20% e 25%, tendência uniforme independentemente da amplitude avaliada. O reforço, por sua vez, mostrou comportamento inverso, aumentando com a frequência em concordância com a tendência já observada no Capítulo V para a alimentação pulsada de arame sob corrente constante e que, portanto, se mantém independentemente da estratégia de corrente utilizada.

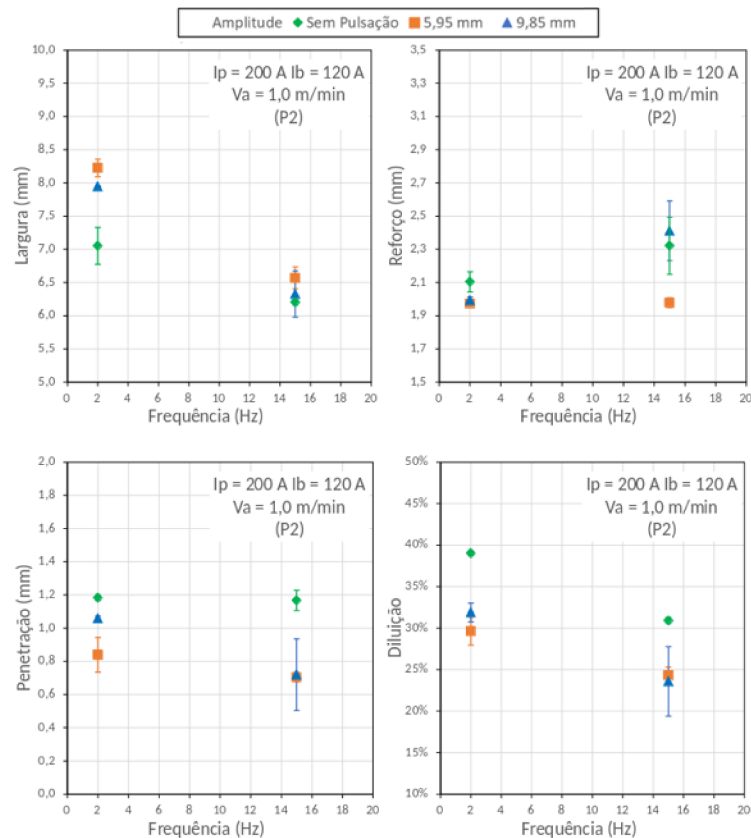
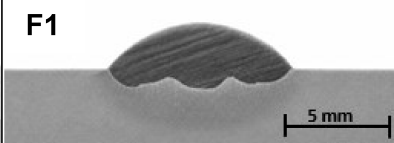
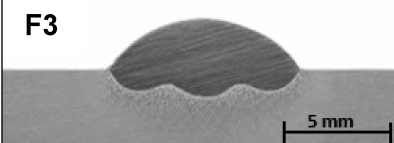
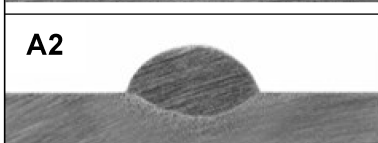
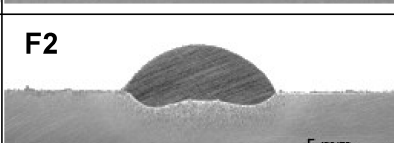
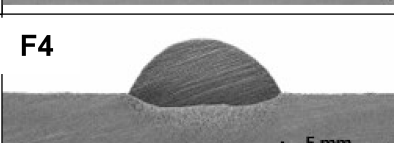


Figura 6.11 - Largura, reforço, penetração e diluição do Grupo F em função da frequência de pulsação, agrupadas por amplitude ($A \sim 6$ mm e $A \sim 10$ mm)

Tabela 6.7 - Macrografias dos cordões de referência do Grupo A (A1 e A2) e do Grupo F (F1 a F4)

			Amplitude de Pulsação (mm)							
Alimentação Contínua			5,95	9,85						
A1		5 mm	F1		5 mm	F3		5 mm	2	Frequência (Hz)
A2		5 mm	F2		5 mm	F4		5 mm	15	

Na frequência de 15 Hz, o período do ciclo é de aproximadamente 67 ms, dos quais cerca de 33 ms correspondem ao intervalo de contato do arame com a poça de fusão. Embora esse intervalo seja suficiente para que a corrente de pico promova a fusão do arame e a transferência do material de adição, o tempo contínuo disponível para o aquecimento da poça de fusão e do metal de base sob a ação da corrente de pico torna-se reduzido. Além disso, o aumento da frequência eleva o número de eventos de contato arame-poça por unidade de tempo, de modo que uma parcela maior da energia disponível é consumida na fusão do material de adição, restando menor contribuição para a expansão e penetração da poça. Esse mecanismo explica a redução simultânea de largura, penetração e diluição observada no caso com 15 Hz.

A variação da amplitude de pulsação apresentou pouca influência sobre a geometria do cordão de solda. Comparando os testes F1 versus F3 (mesma $F = 2$ Hz, amplitudes distintas), verifica-se elevação da penetração de 0,84 para 1,06 mm (+26%) com o aumento da amplitude de pulsação do arame de 6 para 10 mm, sem alteração expressiva na largura ou diluição. Esse comportamento é fisicamente coerente: amplitude maior implica maior deslocamento do arame durante o recuo, diminuindo o tempo de permanência do arame na fonte térmica por ciclo e, conseqüentemente, diminuindo o efeito do resfriamento da poça de fusão, aumentando a penetração. A frequência de 15 Hz, por sua vez, limita esse efeito: a diferença de penetração entre F2 (0,70 mm) e F4 (0,72 mm) é estatisticamente irrelevante, confirmando que o período curto do ciclo impõe um teto ao efeito da amplitude de pulsação do arame.

6.4.1.4 Inversão da Lógica de Sincronismo

O Grupo E foi concebido para avaliar as consequências da inversão da lógica de sincronismo, na qual a corrente de base ($I_b = 80$ A) era aplicada durante o contato do arame com a poça de fusão, enquanto a corrente de pico ($I_p = 160$ A) era aplicada durante a fase de recuo, condição oposta à do Grupo D. Sob o ponto de vista energético, essa configuração é a princípio desfavorável, pois aplica o menor nível de corrente justamente no instante de maior demanda térmica do processo, associado à fusão do material de adição e à transferência metálica, enquanto o maior nível de corrente é aplicado quando o arame se encontra afastado da fonte térmica.

De acordo com a Tabela 6.6, os resultados obtidos no Grupo E, fornecem evidências experimentais de que a estratégia adotada nos demais grupos, caracterizada pela aplicação da corrente de pico durante o contato do arame com a poça de fusão, favorece a transferência metálica e conduz a resultados geométricos mais estáveis e consistentes. Dessa forma, os resultados corroboram a hipótese central deste trabalho de que a sincronização entre a posição instantânea do arame e o aporte térmico constitui um mecanismo eficaz para o controle do processo de deposição.

6.4.1.5 Expansão da Faixa Operacional do Processo

Pode se dizer que o resultado mais relevante do Experimento 1 em termos operacionais não está nas variações geométricas observadas na condição central do envelope (Grupo F), mas na viabilização de condições que, sob corrente constante com alimentação pulsada de arame, resultavam em *wire stubbing* e impossibilitavam a deposição estável de material. No Capítulo V, duas regiões limites foram identificadas como inviáveis nestas condições: (a) baixa corrente média ($I_m \sim 120$ A, $V_a = 1,0$ m/min), explorada no Grupo D, e (b) alta velocidade de alimentação ($V_a = 2,2$ m/min, $I_m \sim 160$ A), explorada no Grupo C.

Com a introdução do sincronismo entre o movimento de avanço e recuo do arame com níveis da corrente de soldagem, a corrente de pico (I_p) passou a ser aplicada nos instantes de maior

demanda energética do processo, correspondentes ao contato do arame com a poça de fusão. Esse controle temporal do aporte térmico mostrou-se suficiente para promover a fusão do material de adição nas regiões limites. É importante destacar que a viabilização dessas condições não está associada a um aumento do aporte térmico médio do processo, mas à aplicação mais eficiente da energia ao longo do ciclo de pulsação (de forma mais otimizada de acordo com a posição do arame de adição junto à poça). Dessa forma, mesmo em condições com correntes médias próximas (equivalentes) às dos ensaios de referência, foi possível obter cordões estáveis.

No Grupo C ($V_a = 2,2$ m/min), por exemplo, os ensaios sem pulsação de arame (C1: $I_m = 168,8$ A; C2: $I_m = 169,4$ A) já produziram cordões com reforço elevado (3,2-3,4 mm) e diluição muito baixa (6-7%), características típicas de uma condição operando próxima ao limite superior do envelope de trabalho, onde a elevada taxa de deposição reduz a fusão do metal base. Com a utilização da maior amplitude de pulsação (C5 e C6), as correntes médias permaneceram próximas às observadas nas condições sem pulsação de arame (169,8 A e 167,0 A, respectivamente), evidenciando uma atuação mais adequada da estratégia de sincronismo. Nesses casos, o processo manteve-se estável e a deposição de material foi viabilizada sem ocorrência de *wire stubbing*. O ensaio C6 ($A \sim 10$ mm e $F = 15$ Hz), em particular, apresentou reforço de 5,38 mm associado a uma diluição de apenas 10%, combinação impossível de ser obtida com alimentação pulsada de arame sob corrente constante na mesma velocidade de alimentação (Tabela 6.8).

Tabela 6.8 - Macrografias dos cordões do Grupo C (C1, C2, C5 e C6), que apresentam I_m próximas.

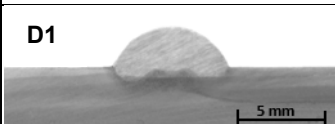
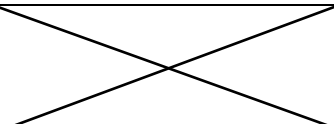
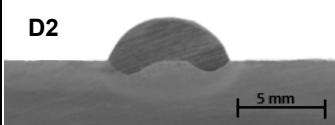
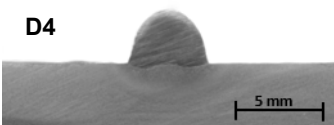
Alimentação Contínua	Alimentação Pulsada Amplitude = 9,85 mm		
C1	C5	2	Frequência (Hz)
C2	C6		
		15	

Fisicamente, esse comportamento pode ser atribuído à combinação entre elevada velocidade de alimentação de arame, grande amplitude de pulsação da alimentação e em alta frequência. A elevada taxa de alimentação aumenta o volume de material depositado por unidade de comprimento, enquanto a maior amplitude reduz o tempo de permanência do arame na poça de fusão durante cada ciclo. Simultaneamente, a alta frequência reduz a duração de cada evento de contato, limitando o tempo disponível para a transferência metálica. Como consequência, uma parcela significativa da energia é consumida na fusão do material de adição, reduzindo a participação relativa da fusão do metal de adição. O resultado é a formação de cordões com elevado reforço e baixa diluição, o que pode ser benéfico de se explorar em processos de revestimento e

manufatura aditiva por deposição a arco elétrico (MADA), nos quais se busca maximizar a deposição de material e minimizar a fusão do substrato.

Já no Grupo D ($I_p = 160$ A; $I_b = 80$ A; I_m nominal ~ 120 A), os ensaios sem pulsação de arame (D1: $I_m = 123,5$ A; D2: $I_m = 124,5$ A) produziram cordões estreitos (largura de 5,7 a 6,4 mm) e com diluição relativamente baixa (17 a 22%), características compatíveis com o menor aporte térmico disponível nessa condição. Quando utilizada a condição de pequena amplitude e elevada frequência de pulsação de arame (ensaio D4: $I_m = 121,8$ A), a corrente média permaneceu próxima ao valor nominal do grupo, resultando em maior estabilidade do processo. Nessa condição, foi obtida diluição de apenas 7%, o segundo menor valor registrado em todo o experimento (Tabela 6.9). Esse resultado é particularmente relevante para aplicações em que se deseja minimizar a participação do metal de base na composição final do depósito, como em operações de revestimento.

Tabela 6.9 - Macrografias dos cordões do Grupo D (D1, D2 e D4), que apresentam I_m próximas. (A condição D3 não foi apresentada por apresentar corrente média de soldagem significativamente inferior às demais condições do grupo D)

Alimentação Contínua		Alimentação Pulsada Amplitude = 9,85 mm		Frequência (Hz)
D1				
D2		D4		

De forma geral, os resultados dos testes demonstram que o sincronismo entre o movimento do arame e o nível da corrente foi capaz de viabilizar a operação nas regiões limites investigadas do envelope de trabalho (Grupo C e D), anteriormente limitada pela ocorrência de *wire stubbing* quando empregada a alimentação pulsada de arame sob corrente constante. Além disso, os resultados sugerem que essa estratégia possui potencial para expandir os limites operacionais do processo, aspecto que será investigado de forma mais aprofundada no capítulo seguinte.

6.4.1.6 Comparação das Estratégias de Controle

O Grupo F replicou as condições operacionais do Grupo A ($I_p = 200$ A; $I_b = 120$ A; $V_a = 1,0$ m/min) utilizando o Programa V2, possibilitando comparação direta entre as duas estratégias de controle do sincronismo sob as mesmas condições nominais de processo.

A diferença fundamental entre os programas reside no sistema de desativação de I_p . No Programa V1, I_p é mantido ativo até que a V_{EA} caia abaixo do limiar de desativação, ou seja, até que o sistema interprete o início do recuo do arame. Esse critério adapta o *duty cycle* de I_p à duração real de cada fase do ciclo, tornando o programa sensível às variações dinâmicas do processo. No

Programa V2, I_p é desativado após um intervalo de tempo fixo equivalente à metade do período de pulsação, independentemente da posição real do arame.

Em termos das correntes médias de soldagem (I_m), a análise demonstrou que os resultados obtidos com o Programa V2 apresentaram menor dispersão e maior estabilidade em comparação à versão V1. Dessa forma, o Programa V2 constitui a estratégia mais adequada para a avaliação dos efeitos geométricos da pulsação do arame, uma vez que sua maior estabilidade em termos de corrente média reduz a interação entre os parâmetros de pulsação e o aporte térmico do processo.

6.4.2 Resultados e Discussão - Experimento 2

Em cada ensaio deste grupo de testes, foram adquiridos os sinais de corrente de soldagem, tensão do arco e tensão eletrodo-arama (V_{EA}). A partir desses sinais, foram calculadas a corrente média (I) e tensão média do arco (V) (obtidas por média aritmética dos valores instantâneos dentro do intervalo de regime permanente do cordão), a potência média (P) (calculada como o valor médio do produto instantâneo entre corrente e tensão), e a energia de soldagem por unidade de comprimento de depósito (E) (calculada a partir da potência média e da velocidade de soldagem (V_s), conforme a Equação 6.1, em que V_s é expressa em mm/min. Adicionalmente, foi calculada a Permanência do Arame na Fonte Térmica (PAFT), definida como o percentual de tempo em que a ponta do arame permaneceu sob a ação térmica do arco e/ou em contato com a poça de fusão. Essa métrica foi determinada a partir da análise do sinal de tensão eletrodo-arama (V_{EA}), correspondendo à razão percentual entre o tempo em que a V_{EA} permaneceu acima de um limiar previamente estabelecido e o tempo total analisado, conforme apresentado na Equação 6.2. Os parâmetros de cada teste e as grandezas elétricas medidas e calculadas estão na Tabela 6.10.

$$E = \frac{(P \times 60)}{V_s} \left[\frac{J}{mm} \right] \quad \text{Equação 6.1}$$

$$PAFT = \frac{T_{contato}}{T_{total}} \times 100\% \quad \text{Equação 6.2}$$

Tabela 6.10 - Parâmetros de soldagem e grandezas elétricas. I_p : corrente de pico; I_b : corrente de base; F1: frequência da corrente; A: amplitude da pulsação do arame; F2: frequência de pulsação do arame; I : corrente média de soldagem; V : tensão média; P : potência média; E : energia de soldagem; V_{EA} : tensão eletrodo-arama média; PAFT: permanência do arame na fonte térmica

Teste	I_p (A)	I_b (A)	F1 (Hz)	A (mm)	F2 (Hz)	I (A)	V (V)	P (W)	E (J/mm)	V_{EA} (V)	PAFT
1	160	160	0	0	0	159	12,1	1925	1155	8,9	100%
2	200	120	2	0	0	159	12,2	1979	1188	9,2	100%
3	200	120	15	0	0	159	12,6	2058	1235	8,9	93%
4	160	160	2	6	2	160	12,4	1986	1192	7,2	45%
5	160	160	15	6	15	160	12,8	2041	1225	7,3	51%
6	160	160	2	10	2	160	12,8	2048	1229	5,2	41%
7	160	160	15	10	15	160	13,3	2124	1274	4,6	37%
8	200	120	2	6	2	159	12,5	2023	1214	7,1	47%
9	200	120	15	6	15	159	12,6	2059	1235	7,5	60%
10	200	120	2	10	2	159	12,0	1961	1176	5,1	45%
11	200	120	15	10	15	160	12,8	2100	1260	4,6	40%

Em relação ao aspecto da geometria do cordão, foram medidas a largura, o reforço, a profundidade de penetração e a diluição (relação entre área do metal de base fundido e área total fundida da seção transversal), sempre com auxílio do software ImageJ® a partir de macrografias de três seções transversais por cordão. A Tabela 6.11 apresenta a média e o desvio-padrão (DP) das grandezas geométricas para os onze ensaios realizados.

Tabela 6.11 - Aspectos geométricos dos cordões de solda obtidos nos ensaios do Experimento 2.
(DP: desvio-padrão)

Teste	Ip (A)	Ib (A)	F1 (Hz)	A (mm)	F2 (Hz)	Larg. (mm)	DP	Ref. (mm)	DP	Pen. (mm)	DP	Dil. (%).	DP
1	160	160	0	0	0	7,5	0,2	1,9	0,0	1,5	0,2	44%	2%
2	200	120	2	0	0	8,2	0,1	1,8	0,0	1,3	0,0	46%	2%
3	200	120	15	0	0	8,0	0,1	1,8	0,0	1,0	0,1	36%	1%
4	160	160	2	6	2	7,8	0,1	1,7	0,0	1,5	0,2	47%	2%
5	160	160	15	6	15	7,7	0,1	1,8	0,0	1,1	0,1	39%	1%
6	160	160	2	10	2	8,0	0,2	1,7	0,0	1,4	0,1	48%	1%
7	160	160	15	10	15	7,8	0,5	1,8	0,1	1,6	0,1	48%	1%
8	200	120	2	6	2	8,7	0,2	1,7	0,0	1,1	0,1	42%	2%
9	200	120	15	6	15	8,2	0,2	1,8	0,0	0,9	0,1	35%	1%
10	200	120	2	10	2	8,6	0,1	1,7	0,0	1,1	0,0	40%	2%
11	200	120	15	10	15	8,4	0,1	1,8	0,0	1,3	0,1	46%	1%

6.4.2.1 Efeito do Modo de Corrente sobre a Geometria dos Cordões (Bloco 1: Testes 1-3)

A análise do Bloco 1 de testes, no qual a alimentação do arame foi mantida contínua (sem pulsação), permite isolar o efeito do modo da corrente de soldagem sobre os aspectos geométricos do cordão. Os resultados consolidados na Tabela 6.11 indicam que a pulsação da corrente promoveu um leve aumento da largura do cordão em comparação à condição com corrente constante: a largura passou de 7,5 mm (teste 1) para 8,2 mm e 8,0 mm nos testes 2 e 3, respectivamente. O reforço, em contrapartida, manteve-se praticamente inalterado entre os três ensaios, com valores em torno de 1,8 mm. Acredita-se que atuação da corrente de pico tenha aumentado a extensão (largura) da área fundida (sobrepondo reduções do poder de fusão quando na corrente de base), mas a alternância para a corrente de base (mesma corrente média que no caso da corrente constante) foi capaz de manter o reforço sem alteração significativa.

A profundidade de penetração e a diluição apresentaram comportamento dependente da frequência de pulsação. Em frequência baixa (F1 = 2 Hz, teste 2), os valores de penetração (1,3 mm) e de diluição (46%) permaneceram próximos aos da corrente constante (1,5 mm e 44%). Em frequência elevada (F1 = 15 Hz, teste 3), houve redução mais significativa tanto da penetração (1,0 mm) quanto da diluição (36%). A redução de penetração e de diluição em frequência elevada de pulsação da corrente, mesmo com a PAFT inferior, sugere o efeito predominante decorre da pulsação da corrente em si: o aumento da frequência implica menores intervalos de aplicação da corrente de pico em cada ciclo e maior agitação eletromagnética da poça, que tende a distribuir lateralmente o calor, favorecendo o aumento da largura, em detrimento da penetração axial. Esse

comportamento é coerente com os relatos de Riffel (2019, 2020) para o processo TIG com corrente pulsada.

6.4.2.2 Efeito da Pulsção do Arame em Corrente Constante sobre a Geometria dos Cordões (Bloco 2: testes 1, 4 a 7)

A Figura 6.12 sintetiza os resultados geométricos obtidos no Bloco 2, no qual a corrente de soldagem foi mantida constante ($I = 160$ A) e foram variadas a amplitude ($A = 6$ e 10 mm) e a frequência de pulsação do arame ($F2 = 2$ e 15 Hz).

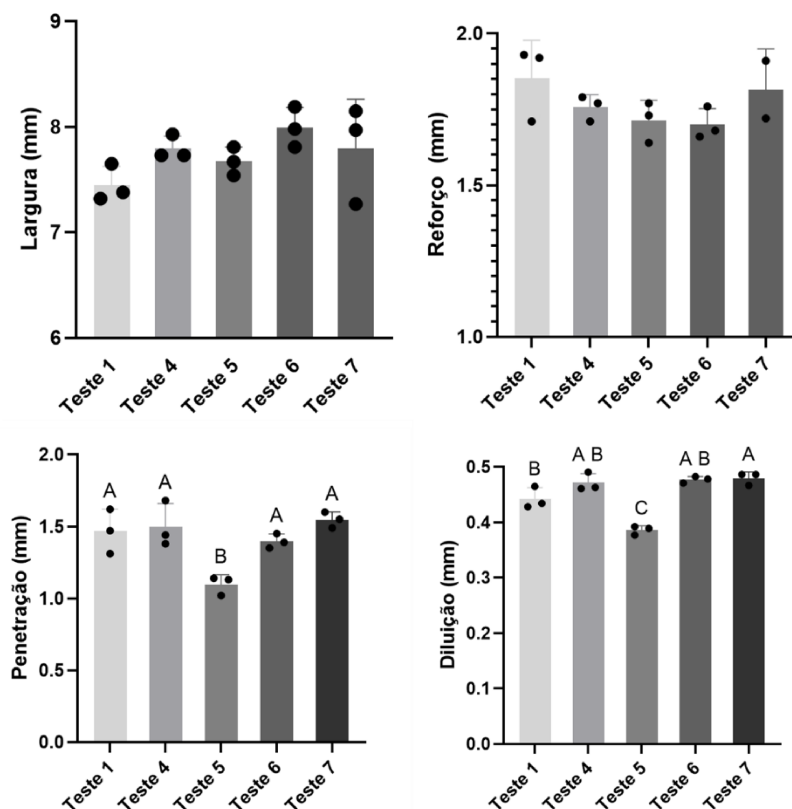


Figura 6.12 - Resultados geométricos dos cordões de solda obtidos nos Testes 1, 4 a 7. Letras distintas indicam diferenças estatisticamente significativas entre as médias pelo teste de Tukey ($p < 0,05$)

Os dados obtidos revelam uma diferença estatisticamente significativa na penetração e na diluição entre os ensaios avaliados ($p < 0,05$) na condição de frequência elevada (15 Hz) associada à amplitude reduzida (6 mm) – teste 5, em comparação às demais condições de pulsação do arame. Nessa configuração, a PAFT atingiu o maior valor entre os ensaios com alimentação de arame pulsada em corrente constante (PAFT = 51%), indicando maior tempo de permanência do arame na fonte térmica. O maior tempo de contato implica maior absorção de calor pelo arame de adição, o que pode ter reduzido a temperatura média da poça e/ou seu tamanho e, conseqüentemente, a sua capacidade de fundir o metal de base. O resultado se reflete em menor penetração (1,1 mm) e menor diluição (39%).

Para amplitudes maiores ($A = 10 \text{ mm}$ – testes 6 e 7), a PAFT é reduzida (41% e 37%, respectivamente), indicando que o arame permanece em uma menor fração do tempo em contato com a poça. Em consequência, o efeito de “resfriamento” promovido pelo arame é atenuado, e os valores de penetração (1,4 e 1,6 mm) e diluição (48% em ambos) aproximam-se dos observados no teste 1 (alimentação contínua – sem pulsação). Esse comportamento corrobora a interpretação física segundo a qual a amplitude da pulsação do arame governa diretamente o tempo de permanência do arame na poça: amplitudes maiores implicam maior deslocamento do arame por ciclo, reduzindo a fração do período em que o arame permanece imerso ou em contato com o arco.

A Figura 6.13 apresenta, de forma consolidada, os resultados obtidos nos ensaios realizados no Capítulo V, realizados em condições análogas, mas com frequências superiores de pulsação do arame (11 e 20 Hz). O comportamento observado na etapa anterior é coerente com a tendência identificada nestes novos testes: redução da penetração e da diluição em condições de menor amplitude associadas a maiores frequências de pulsação do arame.

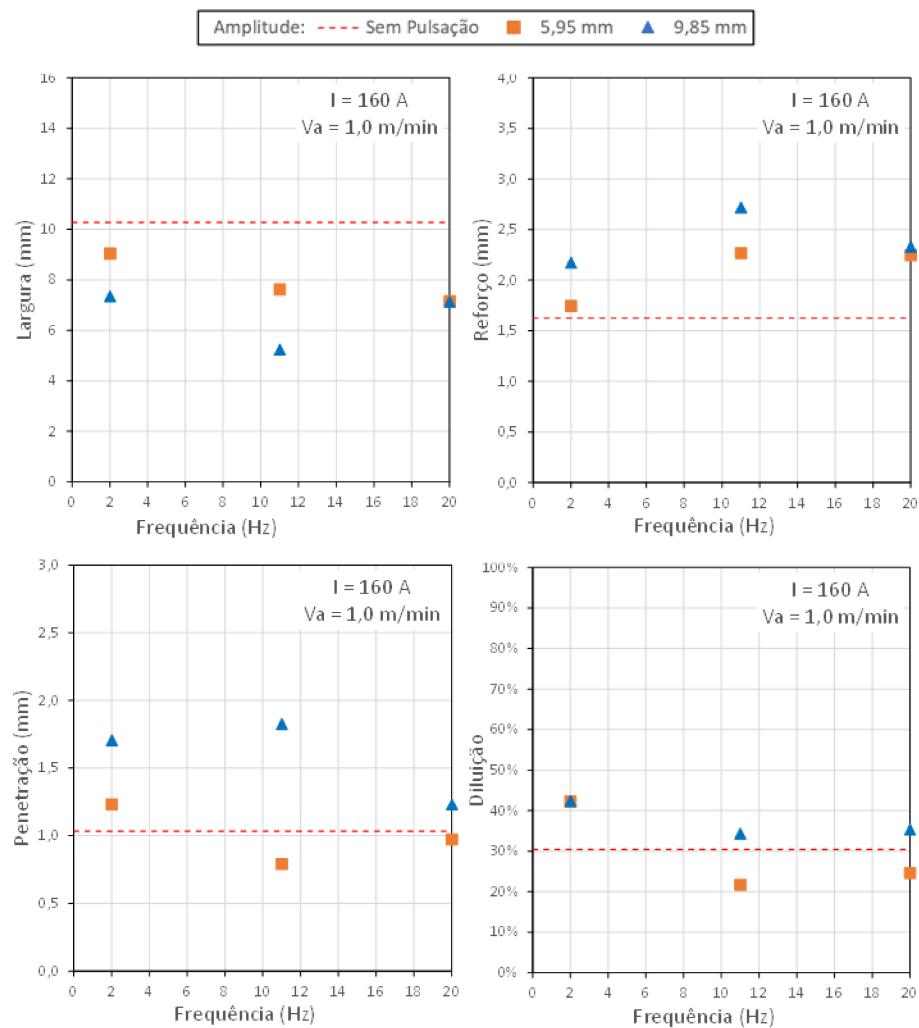


Figura 6.13 - Resultados de experimentos do capítulo anterior em frequências de pulsação do arame 11 e 20 Hz, para fins de comparação.

6.4.2.3 Efeito da Pulsção do Arame em Corrente Pulsada Sincronizada sobre a Geometria dos Cordões (Bloco 3: testes 2, 3, 8 a 11)

A Figura 6.11 apresenta a comparação entre os ensaios em corrente pulsada com alimentação contínua de arame (testes 2 e 3) e os ensaios em corrente pulsada sincronizada com pulsção do arame (testes 8 a 11). Em todos os casos com sincronismo, a frequência de pulsção da corrente foi igualada à frequência de pulsção do arame.

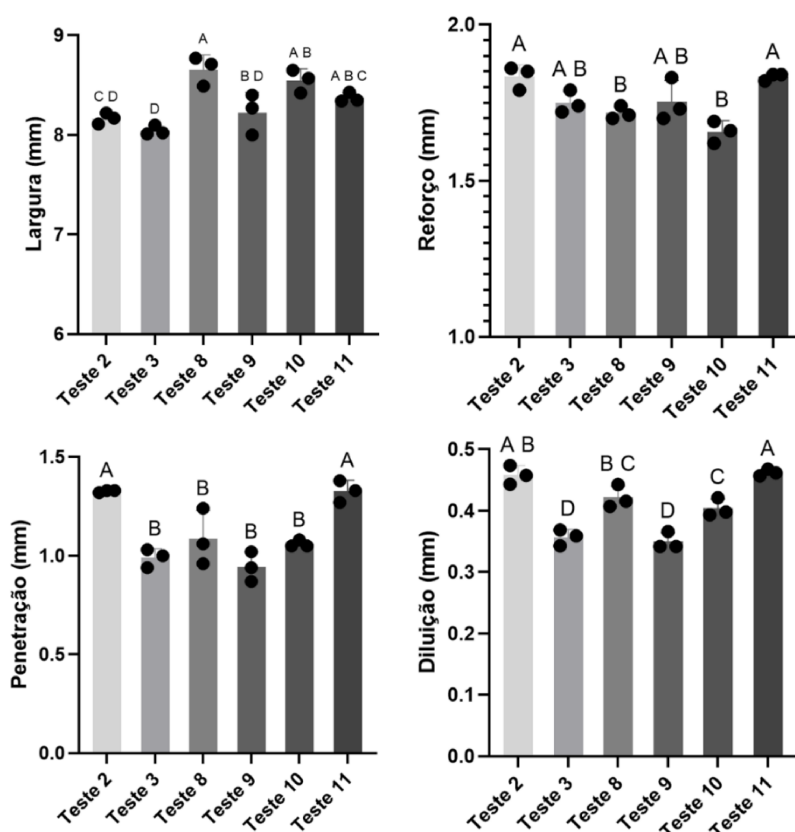


Figura 6.14 - Aspectos geométricos do cordão de solda em função dos parâmetros de pulsção do arame em corrente pulsada sincronizada (Bloco 3)

Em baixa frequência de pulsção do arame (2 Hz), a realização do sincronismo entre a alimentação de arame e a corrente de soldagem (Testes 8 e 10) resultou em diferenças estatisticamente significativas na geometria dos cordões quando comparada à condição de corrente pulsada sem pulsção do arame (Teste 2). Observou-se aumento da largura do cordão, acompanhado de redução do reforço e da penetração, evidenciando que o sincronismo alterou sensivelmente a distribuição do calor e a dinâmica de transferência de material para a poça de fusão. A largura passou de 8,2 mm (teste 2) para 8,7 mm (teste 8) e 8,6 mm (teste 10); a penetração caiu de 1,3 mm para 1,1 mm em ambos os casos. Esse comportamento pode ser atribuído ao efeito combinado do resfriamento promovido pela inserção pulsada do arame na poça, que reduz a penetração, e do maior espalhamento lateral resultante.

Em frequência elevada (15 Hz), observou-se uma inversão parcial desse comportamento, indicando que a influência do sincronismo sobre a geometria do cordão passou a ocorrer de maneira

distinta da verificada em 2 Hz. O teste 11 ($A = 10$ mm) apresentou aumento da largura (8,4 mm), da penetração (1,3 mm) e da diluição (46%) em relação ao teste 3 (sem pulsação do arame, $F1 = 15$ Hz). Esse comportamento é coerente com a baixa PAFT registrada no teste 11 (40 %), a menor entre os ensaios com sincronismo: o curto tempo de permanência do arame na poça reduz seu efeito de resfriamento, permitindo maior absorção de calor pela poça e, conseqüentemente, maior penetração e maior área fundida do metal de base. A baixa PAFT é também coerente com o menor valor médio de tensão eletrodo-arame registrado no teste 11 ($V_{EA} = 4,6$ V), um indicativo de predominância das fases de afastamento sobre as fases do arame enterrado na poça de fusão.

6.4.2.4 Efeito do modo da corrente quando em pulsação do arame sobre a Geometria dos Cordões (Bloco 4: testes 4 a 11)

A Figura 6.15 contrasta diretamente os resultados dos Blocos 2 e 3, com o objetivo de avaliar isoladamente o efeito do modo da corrente de soldagem (constante $\times$ pulsada sincronizada) quando se opera com pulsação do arame.

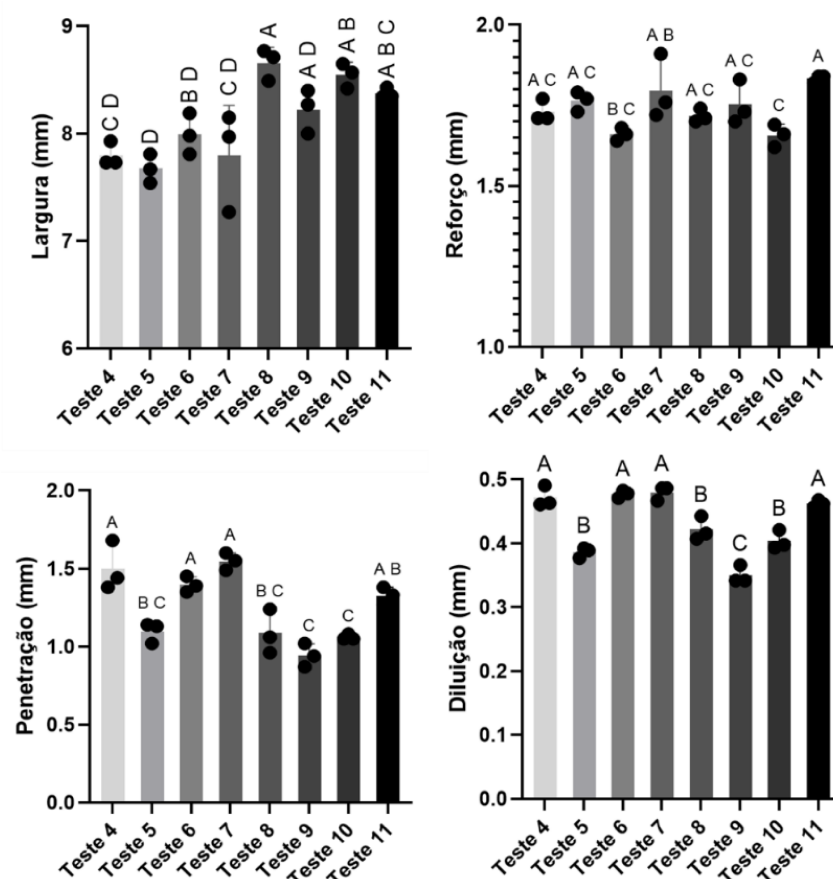


Figura 6.15 - Comparação entre corrente constante (Bloco 2) e corrente pulsada sincronizada (Bloco 3) sob pulsação do arame

Em comparações par-a-par (testes 4×8 , 5×9 , 6×10 e 7×11), observa-se aumento da largura quando se introduz a corrente pulsada sincronizada nas condições de baixa frequência ($F = 2$ Hz, comparações 4×8 e 6×10), mantendo-se a tendência identificada no Bloco 1. Em frequência

elevada ($F = 15$ Hz, comparações 5×9 e 7×11), o aumento de largura também ocorre, embora com menor magnitude e sem significância estatística aparente. Esse comportamento é coerente com o aumento da agitação eletromagnética da poça promovido pela pulsação da corrente, o qual favorece o espalhamento lateral.

O reforço apresentou pouca sensibilidade ao modo de corrente: as variações observadas situam-se dentro da faixa de incerteza experimental, sem configurar tendência clara.

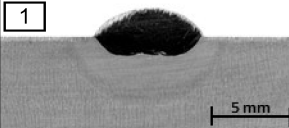
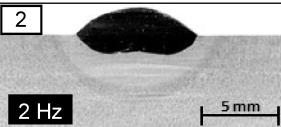
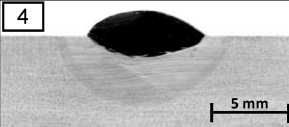
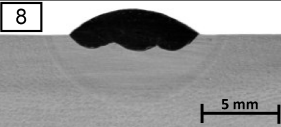
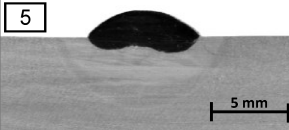
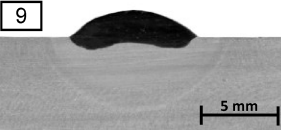
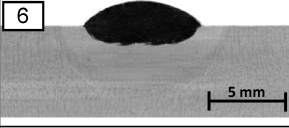
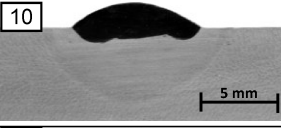
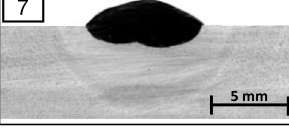
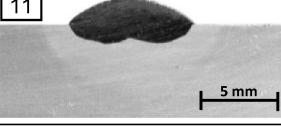
A penetração tendeu a ser menor nos testes com corrente pulsada sincronizada, particularmente em frequência elevada e amplitude reduzida (teste 9: 0,9 mm vs. teste 5: 1,1 mm). Tal redução reforça a interpretação de que a corrente pulsada, em alta frequência, promove distribuição de calor preferencialmente lateral em detrimento da componente axial. A diluição, por sua vez, não apresentou uma tendência clara, sugerindo que sua resposta é resultado da interação da combinação de outras variáveis.

Em síntese, os resultados do Bloco 4 indicam que o modo da corrente de soldagem exerce papel dominante sobre a largura e a penetração dos cordões, ao passo que os parâmetros de pulsação do arame (frequência e amplitude) atuam como mecanismo de ajuste fino, modulando o tempo de permanência do arame na poça (PAFT) e, por essa via, a temperatura média, a fluidez e mesmo tamanho da poça de fusão.

6.4.2.5 Macrografias dos Cordões de Solda

A Tabela 6.12 reúne as macrografias das seções transversais dos cordões para as condições representativas dos testes 1 a 11, permitindo a verificação qualitativa dos efeitos discutidos nas seções anteriores. A análise das macrografias confirma as tendências discutidas nas seções anteriores. Em corrente constante e alimentação contínua (teste 1), o cordão apresenta perfil aproximadamente simétrico, com penetração intermediária e diluição moderada. A introdução da corrente pulsada (testes 2 e 3) aumenta a largura, com penetração reduzida em frequência elevada. A pulsação do arame em corrente constante (testes 4 a 7) modula esses aspectos, sendo o teste 5 (alta frequência e baixa amplitude de pulsação) aquele com a menor área fundida do metal de base. A combinação de corrente pulsada sincronizada e pulsação do arame (testes 8 a 11) produz cordões com perfil mais largo e menor penetração, com particular destaque para os testes 9 e 11 em frequência elevada.

Tabela 6.12 - Macrografias dos cordões de solda obtidos para os ensaios com velocidade de alimentação fixa (1,0 m/min)

Alimentação Contínua		Corrente de		Soldagem						
		160 A		Ip = 200 A – Ib = 120 A						
Alimentação Contínua		1		2		Alimentação Contínua				
				2 Hz						
				3						
				15 Hz						
Alimentação Pulsada		Amplitude (mm)		5,95		4		8		2
						5		9		15
		9,85		6		10		2		
				7		11		15		
		BLOCO 2		BLOCO 3		BLOCO 4		Frequência (Hz)		
								Alimentação Pulsada		

6.4.3 Validação Visual do Sincronismo por Filmagem de Alta Velocidade

6.4.3.1 Configuração da Bancada de Filmagem

Para validar visualmente o sincronismo entre a pulsação da corrente e a alimentação de arame, bem como avaliar qualitativamente o comportamento da poça de fusão e da transferência metálica, o Experimento 2 foi realizado com a bancada equipada com uma câmera de alta velocidade Xiris®, modelo XIR-1800, posicionada lateralmente à tocha de soldagem, conforme ilustrado na Figura 6.16. A câmera foi configurada para aquisição a 200 fps (frames por segundo), com campo de visão suficiente para capturar simultaneamente a ponta do eletrodo, o arame de adição e a poça de fusão.

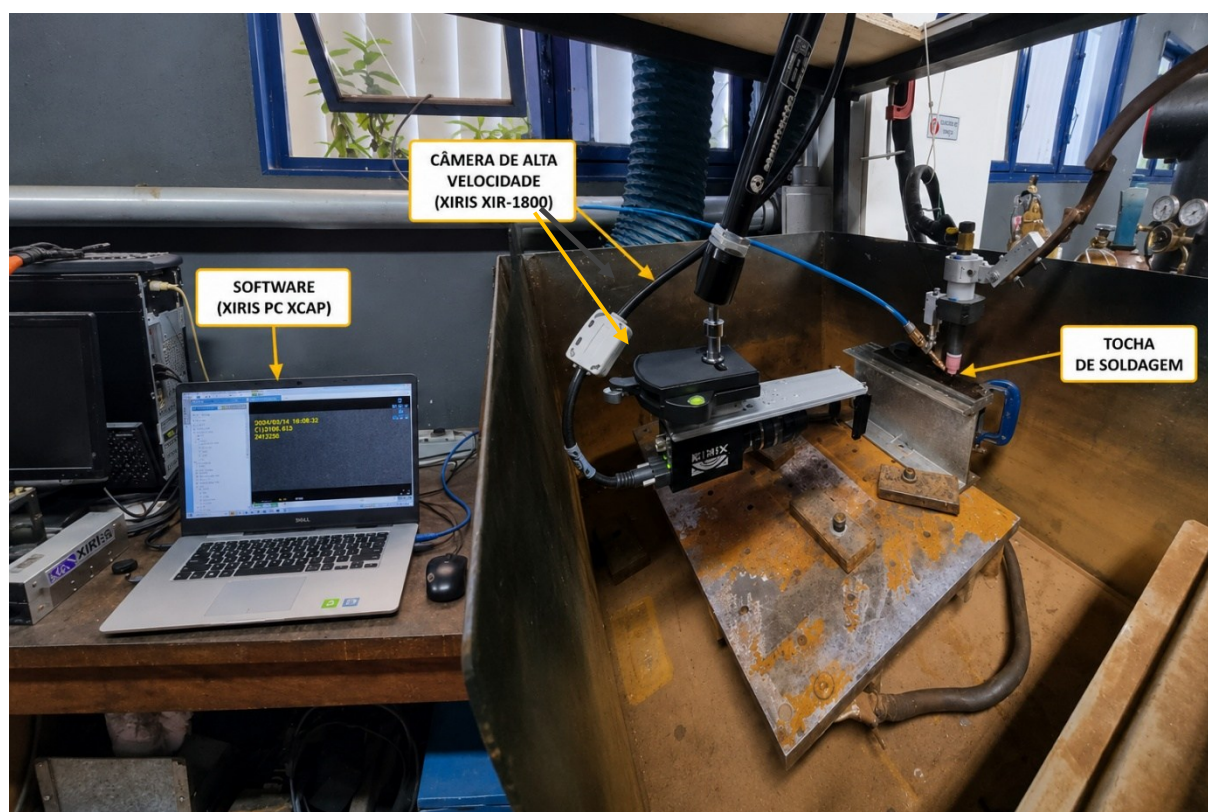


Figura 6.16 - Bancada experimental utilizada para aquisição das imagens de alta velocidade, destacando a câmera Xiris® XIR-1800 posicionada lateralmente à região de soldagem e o notebook empregado para controle da aquisição por meio do software Xiris® WeldStudio Pro.

A análise das imagens foi conduzida quadro a quadro em três regiões temporais distintas dentro do terço central de cada ensaio, adotando-se tolerância de até dois quadros entre o evento mecânico do arame e a correspondente variação de corrente para definição de coincidência temporal. Os 11 testes foram agrupados em três categorias para fins de análise comparativa: (a) corrente constante e pulsada sem pulsação do arame (Testes 1, 2 e 3); (b) pulsação do arame com corrente constante (Testes 4 a 7); e (c) pulsação sincronizada do arame e da corrente (Testes 8 a 11).

6.4.3.2 Condições de Referência: Corrente Constante e Corrente Pulsada sem Pulsação do Arame (Testes 1 a 3)

A Figura 6.17 apresenta a sequência de imagens sincronizadas com os respectivos oscilogramas do Teste 1 (corrente constante, alimentação contínua, $I = 160$ A). As imagens revelam transferência em ponte contínua ao longo de toda a deposição: a ponta do arame permanece em contato permanente com a poça de fusão, mergulhada de forma rasa, sem ruptura da ponte metálica. A poça apresenta comportamento estável, com ausência de oscilações significativas e de respingos. Essa condição configura o cenário de menor perturbação mecânica e energética do processo e serve como linha de base para a avaliação dos efeitos introduzidos pela pulsação.

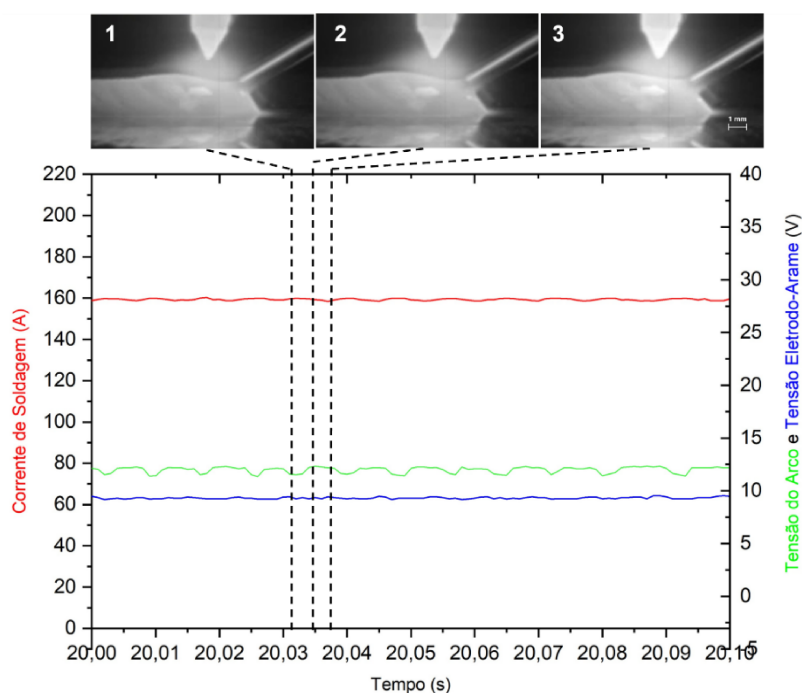


Figura 6.17 - Sequência de imagens obtidas por câmera de alta velocidade sincronizadas com os oscilogramas de corrente de soldagem (I), tensão do arco (V) e tensão eletrodo-arame (V_{EA}) do Teste 1

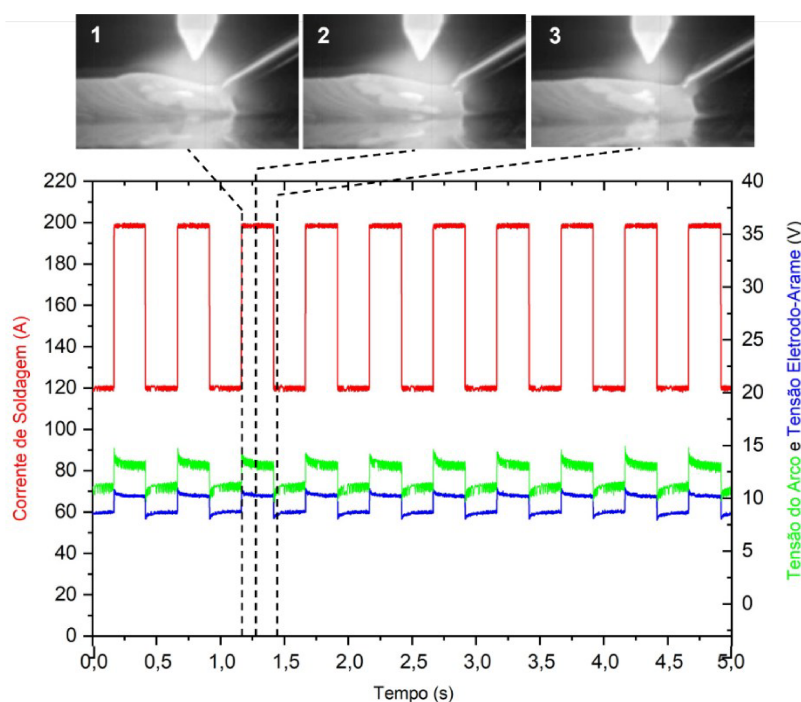


Figura 6.18 - Sequência de Imagens de alta velocidade e oscilogramas sincronizados do Teste 2

Conforme ilustrado na Figura 6.18, o Teste 2 (corrente pulsada a 2 Hz, sem pulsação de arame) mantém a transferência em ponte contínua, mas introduz oscilação periódica na poça de fusão. As imagens evidenciam que a alternância entre corrente de pico ($I_p = 200$ A) e corrente de base ($I_b = 120$ A) gera ciclos de pressão do jato de plasma: em I_p , o arco mais intenso comprime a poça, tornando-a mais baixa e alongada; em I_b , a redução da pressão permite que a poça suba e se contraia. Esse comportamento, observável como oscilação periódica da interface superior da

poça, corresponde à frequência de pulsação da corrente (2 Hz) e explica o aumento de largura medido nos testes 2 e 3 em relação à condição de corrente constante (teste 1): a poça molha lateralmente a chapa com maior intensidade durante os instantes de I_p , favorecendo a expansão da zona fundida.

Já no Teste 3 (corrente pulsada a 15 Hz, sem pulsação de arame), mostrado na Figura 6.19, a maior frequência de alternância I_p/I_b não permite que a poça se estabilize entre os ciclos de pressão do arco, resultando em uma poça muito oscilante. Em determinados instantes, a oscilação da poça é suficiente para romper a ponte metálica, convertendo a transferência de contínua para interrompida sem que haja qualquer movimento de pulsação do arame. Nos momentos de ponte interrompida, a ponta do arame exibe formato oblíquo, geometria assimétrica resultante do aquecimento recorrente por pulsos de corrente sucessivos que não permitem resfriamento e solidificação uniforme entre os eventos. Apesar da severa oscilação da poça, não foram observados respingos, possivelmente porque a ruptura da ponte ocorre com velocidade relativa baixa, sem a força inercial associada ao movimento mecânico do arame.

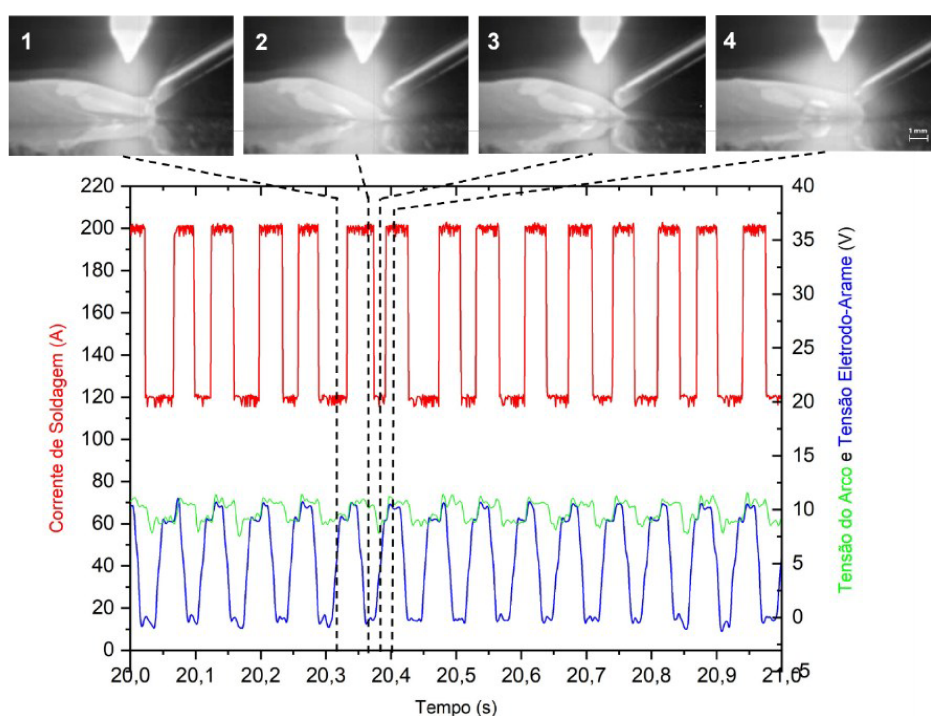


Figura 6.19 - Sequência de Imagens de alta velocidade e oscilogramas sincronizados do Teste 3

A comparação entre os Testes 2 e 3 demonstra que o aumento de frequência de 2 para 15 Hz, com a corrente variando entre os mesmos I_p e I_b , transforma um processo pouco perturbado em um processo com ruptura da ponte metálica, poça muito oscilante e morfologia de ponta assimétrica. Esses efeitos são inteiramente governados pela dinâmica da pressão do arco, um mecanismo que atua mesmo na ausência de qualquer movimento alternado do arame de adição e que será amplificado quando a pulsação mecânica do mesmo for introduzida.

6.4.3.3 Pulsção do Arame com Corrente Constante: Efeitos da Frequência e Amplitude (Testes 4 a 7)

A introdução da pulsção mecânica do arame altera a dinâmica de transferência metálica observada no processo. As Figuras 6.20 a 6.23 apresentam as sequências de imagens sincronizadas com os respectivos oscilogramas para os Testes 4 a 7, realizados com corrente constante e alimentação pulsada do arame. Em todos esses testes a transferência ocorre em ponte interrompida, claramente definida pelos ciclos de avanço e recuo do arame, independentemente da frequência ou amplitude do movimento. Isso contrasta com os Testes 2 e 3, nos quais a ruptura da ponte dependia exclusivamente da oscilação da poça induzida pela corrente. A pulsção mecânica impõe uma cadência estável à transferência, ou seja, o processo passa a ser governado pela pulsção do arame, não pela pulsção do arco/corrente.

A frequência de pulsção é o parâmetro que mais influencia o comportamento observado nas imagens. Com 2 Hz (Testes 4 e 6) o período de 500 ms permite que o arame percorra o ciclo completo de avanço, contato prolongado com a poça e recuo com tempo suficiente para dissipação térmica entre os eventos. Como consequência, a ponta do arame exibe formato semiesférico quando fora da poça (geometria simétrica que indica fusão uniforme do arame de adição), favorecida pela permanência suficiente nas proximidades do arco e da poça e pelo tempo adequado de resfriamento parcial durante o recuo. A poça de fusão comporta-se de forma apenas levemente oscilante, respondendo suavemente à entrada do arame sem apresentar perturbações significativas entre os ciclos de movimento. Ausência de respingos foi observada em ambos os testes a 2 Hz: a baixa frequência implica baixa aceleração no momento da inversão do movimento, de modo que a força inercial sobre o volume fundido na ponta do arame é insuficiente para desprender fragmentos da massa fundida.

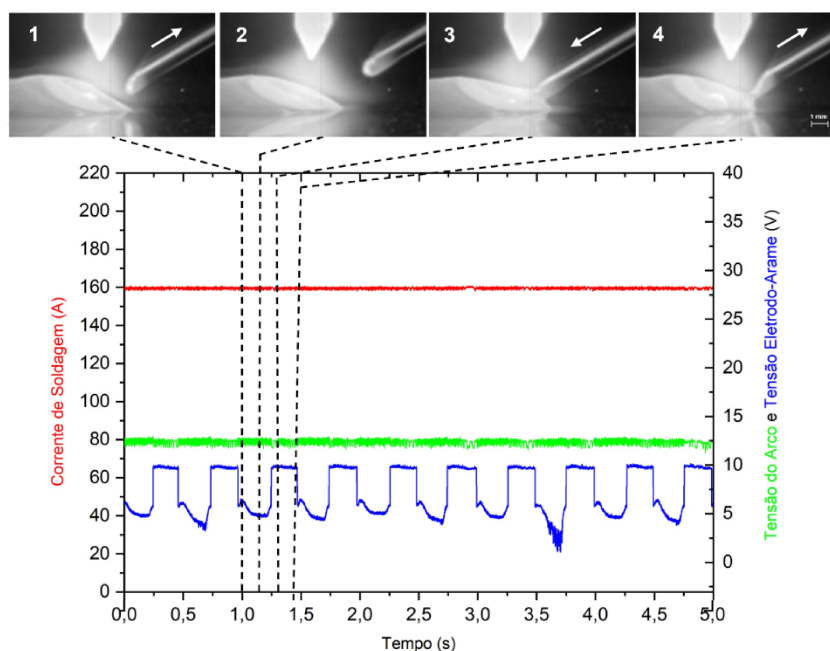


Figura 6.20 - Sequência de Imagens de alta velocidade e oscilogramas sincronizados do Teste 4 ($I = 160$ A, $F = 2$ Hz, $A = 5,95$ mm)

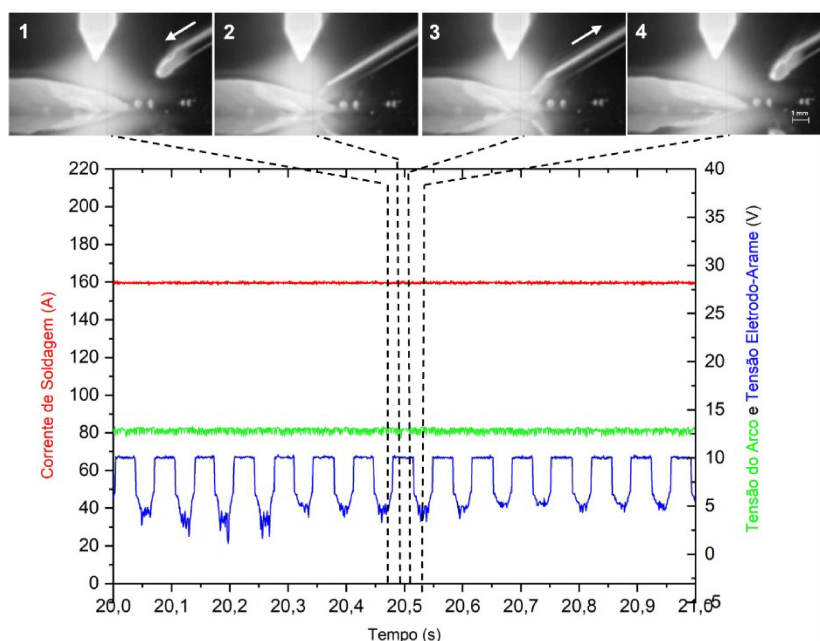


Figura 6.21 - Sequência de Imagens de alta velocidade e oscilogramas sincronizados do Teste 5 ($I = 160$ A, $F = 15$ Hz, $A = 5,95$ mm)

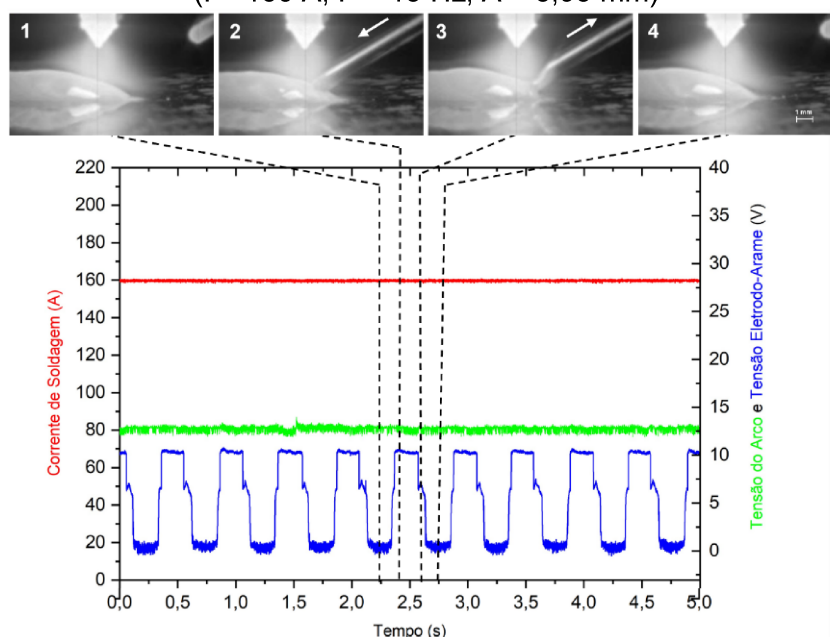


Figura 6.22 - Sequência de Imagens de alta velocidade e oscilogramas sincronizados do Teste 6 ($I = 160$ A, $F = 2$ Hz, $A = 9,85$ mm)

A 15 Hz (Testes 5 e 7), o comportamento muda de forma relevante. O período de 67 ms impõe entradas e saídas rápidas do arame na poça, e a inversão brusca de movimento no recuo gera força inercial suficiente para desprender fragmentos de material fundido da ponta do arame. Os respingos observados são projetados em direção à região à frente da poça de fusão (em uma combinação de força inercial e gravidade), mas são incorporados à solda na passagem subsequente da poça. A ponta fundida do arame apresenta formato oblíquo/assimétrico nas duas condições de 15 Hz: o aquecimento mais recorrente, com menor tempo de resfriamento entre os ciclos de contato, impede a formação da geometria semiesférica uniforme observada a 2 Hz. A poça de fusão é muito oscilante, agitada pelas entradas e saídas repetidas do arame em frequência elevada, efeito que se soma à agitação causada pela amplitude no Teste 7 ($A \sim 10$ mm).

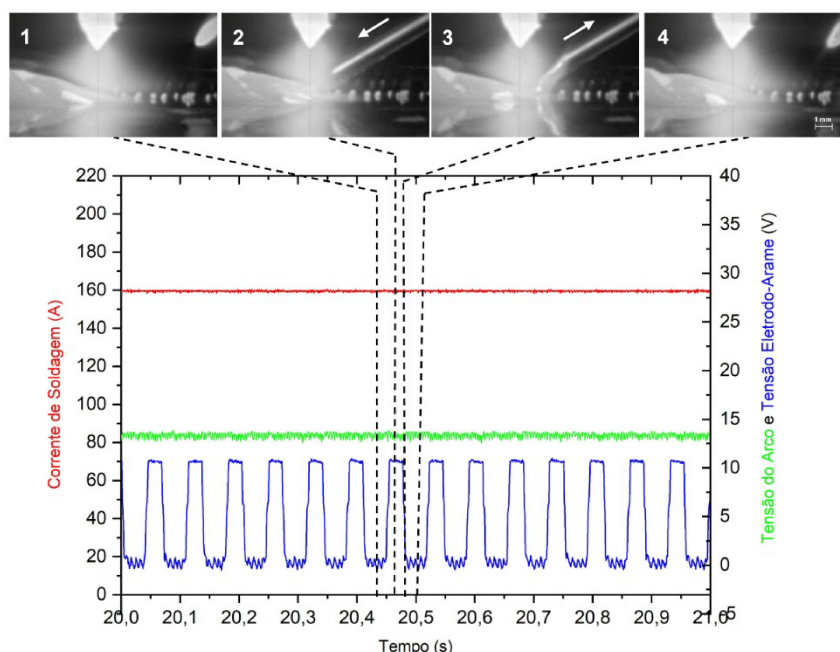


Figura 6.23 - Sequência de Imagens de alta velocidade e oscilogramas sincronizados do Teste 7 ($I = 160$ A, $F = 15$ Hz, $A = 9,85$ mm)

A influência da amplitude de pulsação, quando analisada dentro da mesma frequência, não altera o modo de transferência nem a morfologia da ponta fundida do arame (ambos os fatores são governados predominantemente pela frequência). A amplitude afeta principalmente a intensidade das perturbações: o Teste 7 ($A \sim 10$ mm, $F = 15$ Hz) apresenta poça ainda mais agitada que o Teste 5 ($A \sim 6$ mm, $F = 15$ Hz), enquanto o Teste 6 apresenta vibrações mais pronunciadas que o Teste 4, consistente com a maior excursão do arame no ciclo. Essas diferenças de intensidade, embora observáveis nas imagens, não alteram os mecanismos dominantes definidos pela frequência.

6.4.3.3 Pulsação Sincronizada: Correspondência entre Eventos Elétricos e Posição do Arame (Testes 8 a 11)

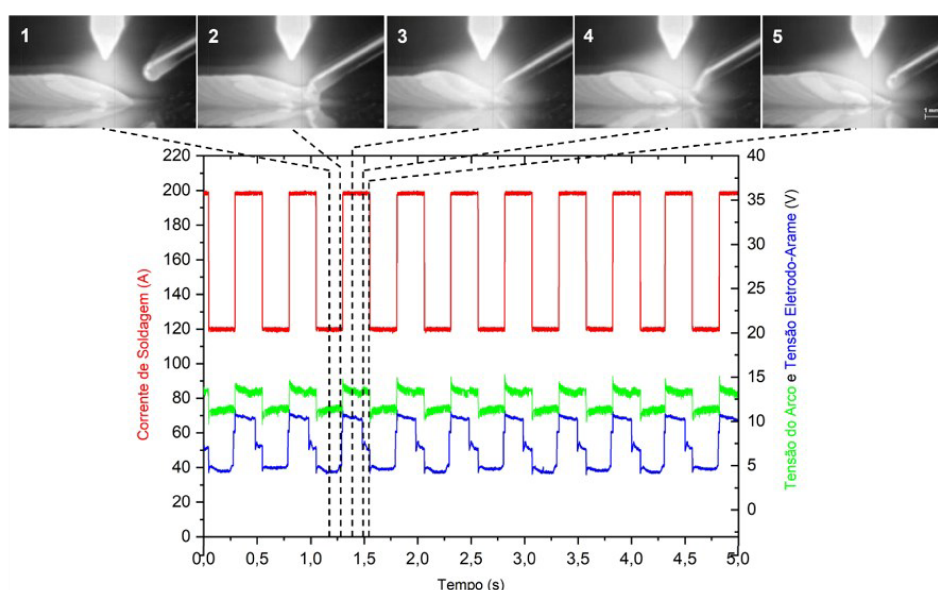


Figura 6.24 - Sequência de Imagens de alta velocidade e oscilogramas sincronizados do Teste 8 ($I_p = 200$ A, $I_b = 120$ A, $F = 2$ Hz, $A = 5,95$ mm)

Os Testes 8 a 11 repetem as condições de pulsação do arame dos Testes 4 a 7, mas com corrente pulsada sincronizada: $I_p = 200$ A é aplicado quando o arame está em avanço/contato com a poça, e $I_b = 120$ A durante o recuo/sem contato com a poça. As Figuras 6.24 a 6.27 apresentam as sequências de imagens sincronizadas com os respectivos oscilogramas para os Testes 8 a 11. A análise das imagens revela que, em termos gerais (modo de transferência, comportamento da poça e formato da ponta do arame), os testes sincronizados são similares a seus correspondentes com corrente constante. Os mesmos padrões dependentes de frequência se mantêm: ponta fundida do arame semiesférica e poça levemente oscilante a 2 Hz (T8, T10); ponta oblíqua, poça muito oscilante e ocorrência de respingos a 15 Hz (T9, T11). Essa semelhança confirma que a frequência de pulsação do arame, e não o modo de corrente, é o parâmetro dominante na determinação do tipo de transferência e da dinâmica da poça nos regimes investigados.

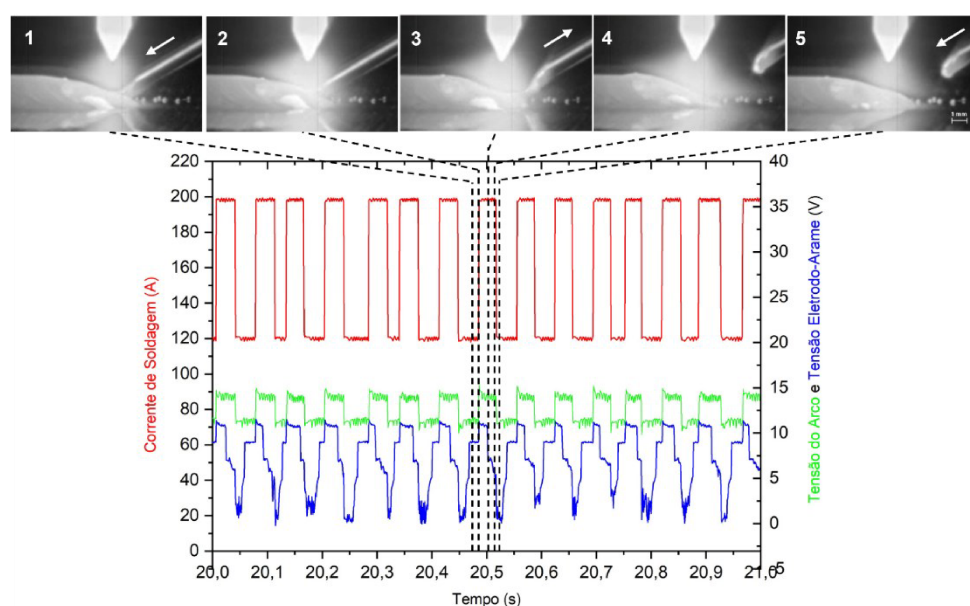


Figura 6.25 - Sequência de Imagens de alta velocidade e oscilogramas sincronizados do Teste 9 ($I_p = 200$ A, $I_b = 120$ A, $F = 15$ Hz, $A = 5,95$ mm)

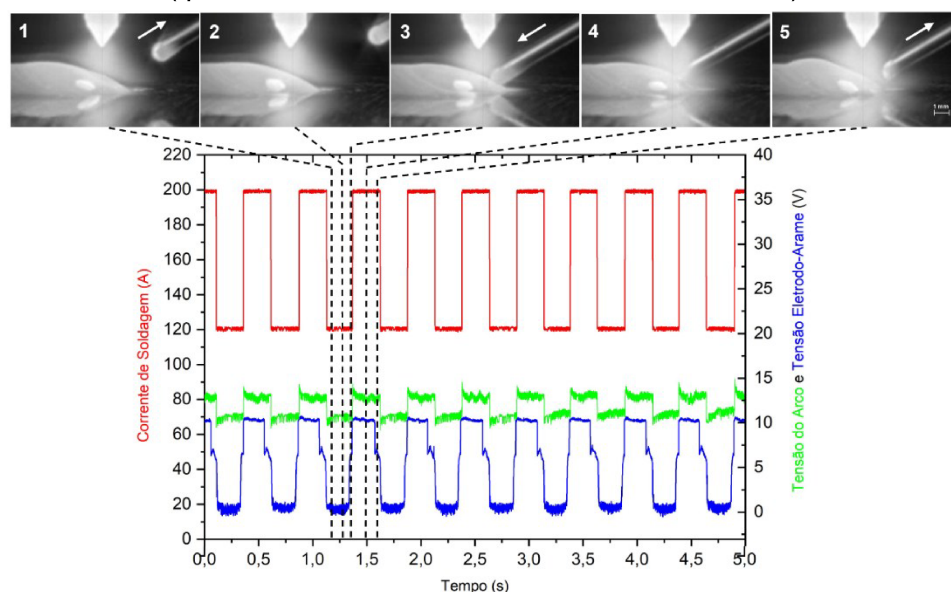


Figura 6.26 - Sequência de Imagens de alta velocidade e oscilogramas sincronizados do Teste 10 ($I_p = 200$ A, $I_b = 120$ A, $F = 2$ Hz, $A = 9,85$ mm)

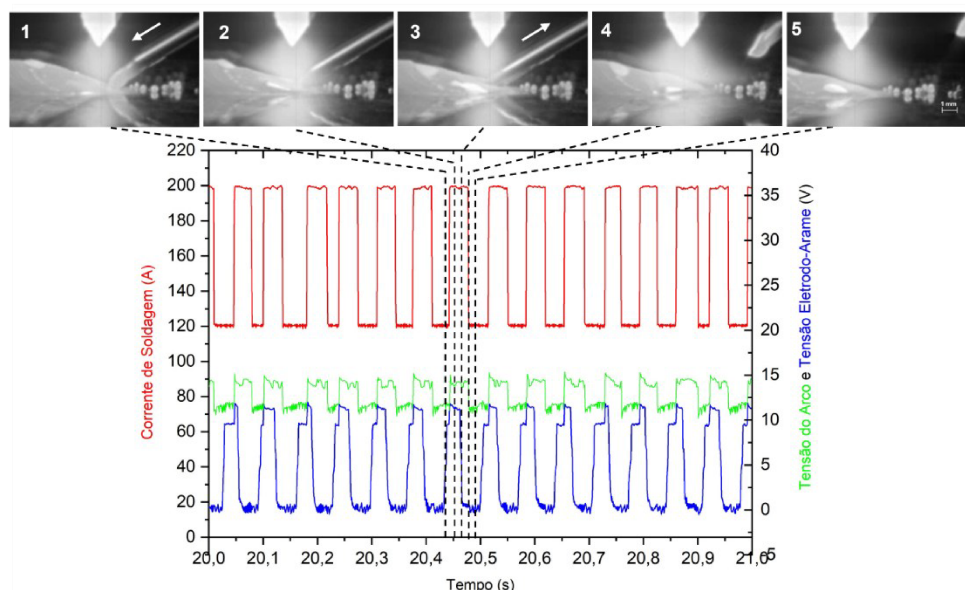


Figura 6.27 - Sequência de Imagens de alta velocidade e oscilogramas sincronizados do Teste 11 ($I_p = 200$ A, $I_b = 120$ A, $F = 15$ Hz, $A = 9,85$ mm)

A diferença qualitativa mais importante introduzida pelo sincronismo entre o movimento pulsado do arame e a variação pulsada da corrente é observada no instante de contato e ruptura da ponte metálica entre o arame e a poça. Nos Testes 4 a 7 (corrente constante) a ruptura da ponte é determinada exclusivamente pelo recuo mecânico do arame: a ponte se mantém enquanto o arame está na poça e se rompe quando o arame se afasta. Nos Testes 8 a 11, a elevação da corrente para I_p no momento do contato introduz um mecanismo adicional de ruptura: a maior pressão do jato de plasma, associada ao pulso de corrente, perturba a poça e acelera a fusão do material na interface arame-poça, contribuindo para a interrupção da ponte metálica antes que o recuo mecânico se complete. Esse comportamento (denominado aqui de forçamento ativo da ruptura) foi observado em todos os quatro testes sincronizados e representa uma diferença física qualitativa em relação aos testes de corrente constante com pulsação de arame.

A observação de que o pulso de corrente de pico, ao ser aplicado durante o contato do arame com a poça, contribui ativamente para a interrupção da ponte metálica tem implicação direta sobre a geometria do cordão. A ruptura mais rápida (antecipada) da ponte reduz o tempo de transferência contínua de material, resultando em menor penetração por ciclo e favorecendo a deposição lateral. Esse mecanismo é consistente com a redução sistemática de penetração (-0,2 a -0,4 mm) e o aumento de largura (+0,5 a +0,9 mm) observados ao comparar os testes sincronizados com seus correspondentes com corrente constante (Testes 8 a 11 x Testes 4 a 7).

A análise quadro a quadro das transições de corrente permitiu quantificar as defasagens entre os oscilogramas e a posição instantânea do arame. Esses resultados são sintetizados na Tabela 6.13.

Tabela 6.13 - Defasagem observada entre a posição instantânea do arame e transições de corrente nos Testes 8 a 11. (Convenção: (+) evento elétrico ocorre após evento mecânico; (-) evento elétrico ocorre antes do evento mecânico)

Teste	A (mm)	F (Hz)	lb→lp após contato (quadros)	lp→lb após o início do recuo (quadros)	Interpretação
T8	~6	2	+2	-4 (antes do recuo)	Tp encerra antes do recuo: lb ativo durante fase final de contato
T9	~6	15	+1	+2 (após início do recuo)	Sincronismo preciso: lb ativo pouco após início do recuo
T10	~10	2	+1	+5 (após início do recuo)	Tp permanece após recuo: lp ativo durante fase inicial do recuo
T11	~10	15	+1	+2 (após início do recuo)	Sincronismo preciso: comportamento similar ao T9

A latência de detecção para a transição lb→lp é de no máximo 2 quadros após o contato do arame com a poça, consistente com a latência de processamento do sinal de V_{EA} reportada na Seção 6.4.1.1. Para uma câmera operando em taxa de 200 fps, essa latência representa intervalo de até 10,0 ms, o que se considera aceitável/adequado para as frequências de operação investigadas.

A transição lp→lb revela, porém, um comportamento assimétrico entre os testes a 2 Hz e 15 Hz. No Teste 8 ($F = 2$ Hz, $A \sim 6$ mm), o Tp fixo do Programa V2 encerra a aplicação de lp 4 quadros antes do início do recuo mecânico do arame, ou seja, a corrente retorna a lb enquanto o arame ainda está em contato com a poça. Esse desalinhamento, embora de curta duração, reduz a efetividade do forçamento ativo da ruptura nessa condição e é fisicamente coerente com a menor diferença geométrica observada entre T4 e T8 em relação aos demais pares. No Teste 10 ($F = 2$ Hz, $A \sim 10$ mm), a situação é oposta: lp permanece ativo por 5 quadros após o início do recuo, estendendo-se para a fase de afastamento do arame. Esse prolongamento de lp no início do recuo corresponde a maior aporte térmico durante a fase de arco livre (intervalo no qual a energia de pico atua diretamente sobre o metal de base e poça), explicando a maior largura observada em T10 (8,6 mm) em relação ao seu correspondente com corrente constante (T6: 8,0 mm).

Nos Testes 9 e 11 ($F = 15$ Hz), a transição lp→lb ocorre de forma muito mais precisa: apenas 2 quadros após o início do recuo do arame em ambos os casos. A menor duração do ciclo a 15 Hz (67 ms) reduz o impacto relativo do desalinhamento, e o sistema demonstra maior precisão de sincronismo nessa frequência do que poderia ser esperado, possivelmente porque o período fixo de Tp (33 ms) alinha-se bem com a duração real da fase de contato do arame nessas condições.

Em conjunto, as imagens de alta velocidade validam experimentalmente o princípio de funcionamento do sistema de sincronismo, demonstrando que a aplicação da corrente de pico ocorre em correspondência temporal com os eventos de contato do arame com a poça de fusão. Nessas condições, o pulso de corrente contribui para a interrupção mais rápida da ponte metálica, reduzindo o tempo de transferência contínua de material e favorecendo o espalhamento lateral da poça. Esse comportamento é consistente com as alterações geométricas observadas nos ensaios sincronizados, caracterizadas pela redução da penetração e aumento da largura do cordão em relação às condições de corrente constante.

6.5 Considerações Parciais

Os resultados demonstraram que o sistema foi capaz de detectar e processar os eventos associados ao movimento do arame com tempo de resposta compatível com as frequências avaliadas, permitindo a aplicação prática do conceito de sincronismo entre a pulsação da alimentação de arame com os níveis de corrente de soldagem. Os dois programas de sincronismo desenvolvidos apresentaram características complementares: o Programa V1 mostrou maior capacidade de adaptação ao comportamento dinâmico do processo, enquanto o Programa V2 permitiu manter a corrente média praticamente constante.

No Experimento 1, verificou-se que o sincronismo possibilitou a operação em condições anteriormente limitadas pela ocorrência de *wire stubbing*, ampliando o envelope de trabalho do processo. Os resultados também evidenciaram que a aplicação da corrente de pico durante o contato do arame com a poça influencia diretamente a geometria dos cordões, reduzindo a diluição e favorecendo a deposição de material, enquanto a inversão da lógica de sincronismo confirmou a importância do momento de aplicação da corrente para o controle do processo.

O Experimento 2 permitiu avaliar os efeitos do modo de corrente, da frequência e da amplitude de pulsação do arame sobre a geometria dos cordões. As diferenças observadas devem ser interpretadas considerando que o próprio modo de corrente, constante ou pulsada, também influencia a geometria do cordão. Nesse contexto, o sincronismo apresentou tendências de aumento da largura e redução da penetração e da diluição, destacando-se principalmente pela possibilidade de coordenar a corrente com o movimento do arame, mantendo aproximadamente o mesmo aporte térmico médio.

As análises realizadas por meio de filmagem em alta velocidade confirmaram a correspondência entre os sinais elétricos e os eventos físicos observados na transferência metálica, permitindo compreender os mecanismos responsáveis pelas alterações geométricas verificadas experimentalmente. Os resultados indicaram que o sincronismo atua não apenas como uma estratégia de coordenação temporal, mas também como um mecanismo ativo de controle da interação entre o arame, a poça de fusão e o arco elétrico.

De forma geral, conclui-se que o sincronismo entre a pulsação da alimentação de arame e a corrente de soldagem pode ser explorada como uma ferramenta efetiva para o controle da transferência metálica e da distribuição temporal do aporte térmico, possibilitando ampliar o envelope de trabalho do processo e fornecer maior flexibilidade no ajuste da largura, penetração e diluição dos cordões. Os resultados obtidos estabelecem uma base experimental sólida para possíveis aplicações em revestimentos, deposição multipasse (MADA) e operações que demandem baixos níveis de diluição, além de indicarem oportunidades para o desenvolvimento de estratégias de controle mais avançadas e adaptativas. Além disso, as análises realizadas fornecem subsídios consistentes para a seleção e definição dos parâmetros de sincronismo empregados na etapa subsequente desta tese, dedicada à demonstração do potencial da técnica de sincronismo entre o aporte de material e o aporte energia no processo TIG.

CAPÍTULO VII

CARACTERIZAÇÃO DO SINCRONISMO: AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE DE DEPOSIÇÃO, ASPECTOS METALÚRGICOS E TERMOGRÁFICOS

7.1 Considerações Iniciais e Objetivo do Capítulo

Os capítulos anteriores desta tese trataram do desenvolvimento e avaliação do dispositivo pulsador de arame (Capítulo IV), da definição e avaliação do envelope de trabalho do processo TIG com alimentação pulsada de arame e corrente de soldagem constante (Capítulo V) e do desenvolvimento e validação do sistema de sincronismo entre a pulsação do arame e a pulsação da corrente de soldagem (Capítulo VI). Em conjunto, esses resultados demonstraram que é possível coordenar a posição instantânea do arame de adição com o nível de energia do arco, de modo que o arame avance em direção a poça durante o pulso de corrente de pico (momento de maior demanda/disponibilidade energética) e recue durante a corrente de base. Essa estratégia revelou-se capaz de ampliar a faixa de velocidades de alimentação operacionalmente estáveis em comparação à condição com alimentação pulsada de arame e corrente constante.

O presente capítulo encerra a sequência experimental da tese com um experimento de avaliação integrada, cujo objetivo central foi investigar, de maneira mais abrangente e direta, o potencial prático da técnica de pulsação da alimentação de arame sincronizada à pulsação da corrente de soldagem no processo TIG. Para isso, adotou-se uma estratégia de comparação entre as condições de deposição operando no seu limite de taxa de deposição, definido como a maior velocidade de alimentação que ainda evita o contato da ponta do arame com o substrato (material de base no fundo da poça de fusão), garantindo que cada configuração operasse em condições de máxima produtividade (pelo menos do ponto de vista da capacidade de deposição) com energia equivalente. A comparação foi estruturada entre quatro configurações principais: (1) corrente pulsada sincronizada com alimentação pulsada; (2) corrente constante com alimentação pulsada; (3) corrente constante com alimentação contínua; e (4) corrente pulsada com alimentação contínua.

Os parâmetros de frequência de pulsação (15 Hz) e amplitude de movimento do arame (6 mm) adotados neste capítulo foram definidos com base nos resultados obtidos nos experimentos anteriores. Nestes estudos, a combinação desses valores demonstrou o melhor desempenho em termos de estabilidade operacional do processo (evidenciada pela regularidade dos oscilogramas e pela ausência de *wire stubbing*) e de qualidade geométrica dos cordões depositados, expressa principalmente pelos menores valores de penetração e diluição e pela maior uniformidade do reforço ao longo do comprimento de deposição. A seleção desses parâmetros como referência para os ensaios do presente capítulo visou, portanto, assegurar que as comparações entre as condições

avaliadas fossem realizadas sob a configuração de pulsação mais favorável já identificada, isolando o efeito do sincronismo entre corrente e alimentação como variável central de análise.

Adicionalmente, optou-se por utilizar como metal de adição um aço inoxidável super duplex, depositado sobre um substrato de aço carbono comum. Essa escolha foi motivada pelo interesse em submeter a técnica a um cenário de maior relevância tecnológica e industrial, tipicamente associado a operações de revestimento protetor, no qual os efeitos da condição de deposição sobre a composição química e as fases metalúrgicas formadas são particularmente sensíveis. Os resultados são apresentados e discutidos em termos de capacidade de deposição, características geométricas dos cordões, dureza, diluição química, balanço de fases e análise termográfica.

7.2 Material e Métodos

7.2.1 Material de adição

Como metal de adição foi empregado um arame de aço inoxidável super duplex da classificação ER2594 com diâmetro de 1,2 mm. Essa classe de material apresenta microestrutura bifásica (ferrita + austenita), elevada resistência mecânica e grande resistência a corrosão em ambientes agressivos, notadamente em meios ricos em cloretos. Suas principais aplicações industriais abrangem os setores de óleo e gás, processamento químico e petroquímico, papel e celulose e dessalinização.

Os principais elementos de liga do ER2594 respondem por funções específicas na estabilidade das fases e no desempenho do material. O cromo (Cr), em elevado teor, forma uma camada passiva que confere resistência a corrosão generalizada e a oxidação. O níquel (Ni) atua como estabilizador da fase austenítica, melhorando ductilidade e tenacidade e contribuindo para o equilíbrio entre ferrita e austenita. O molibdênio (Mo) potencializa a resistência a corrosão por pites e frestas em meios cloretados. A composição química do arame de adição utilizado, conforme certificado de qualidade do fabricante, conforme certificado de qualidade do fabricante (Anexo 1), é apresentada na Tabela 7.1.

Tabela 7.1 - Composição química (percentual em massa) do arame de adição ER2594 (Ø 1,2 mm) conforme certificado de qualidade fornecido pelo fabricante.

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	W	Cu	N
0,02	0,4	0,9	0,021	0,002	25,7	3,8	9,8	0,5	0,5	0,21

Em termos metalúrgicos, a solidificação dos aços inoxidáveis super duplex inicia-se com estrutura totalmente ferrítica, a partir da qual a austenita se forma por difusão de nitrogênio e níquel durante o resfriamento. A taxa de resfriamento é, portanto, determinante para o balanço final de fases: resfriamento rápido favorece maior teor de ferrita; resfriamento lento promove maior fração de austenita. Resfriamentos excessivamente lentos na faixa de 900 °C a 600 °C podem precipitar fases deletérias que comprometem severamente a tenacidade e a resistência a corrosão.

7.2.2 Metal de base e dimensões dos corpos de prova

Os substratos utilizados foram chapas de aço carbono com 6 mm de espessura, 50 mm de largura e 250 mm de comprimento. As dimensões foram selecionadas de modo a permitir a deposição de cordões com 120 mm de comprimento em regime estabilizado, descartando-se as regiões de abertura e fechamento do arco nas extremidades, e garantir comparabilidade direta entre as condições quanto à geometria dos cordões depositados.

7.2.3 Condições de deposição e planejamento experimental

O planejamento experimental foi estruturado em torno de quatro configurações principais que combinam o modo de corrente de soldagem (constante ou pulsada a 15 Hz) com o modo de alimentação de arame (contínua ou pulsada a 15 Hz com amplitude de 6 mm). Essas configurações foram avaliadas em duas velocidades de alimentação de arame, no caso 2,2 m/min ou 1,7 m/min, correspondente às maiores velocidades que permitiram a execução da soldagem de forma estável respectivamente nos casos 1A/1B e 2A/2B, sem que a ponta do arame tocasse o metal de base no fundo da poça, conforme descrito na Seção 7.2.5. Os casos 3A/3B, 4A/4B e 5A/5B foram planejados para complemento de comparação. Os testes foram identificados pela codificação apresentada na Tabela 7.2. Cada condição foi executada com réplica, perfazendo um total de 10 testes. Para a realização de todos os experimentos apresentados neste capítulo, foi utilizada a versão 2 (V2) do programa de sincronismo. A adoção desta versão permitiu fixar os níveis médios de corrente e, conseqüentemente, possibilitou operar com energia de soldagem em níveis equivalentes entre as diferentes condições avaliadas. Dessa forma, tornou-se possível comparar os resultados obtidos de maneira mais consistente, isolando os efeitos associados ao modo de corrente de soldagem e ao modo de alimentação do arame, sem a influência de variações da energia térmica do processo.

Tabela 7.2 - Condições de deposição, codificação dos ensaios e configuração de pulsação.
(Ip: corrente de pico; Ib: corrente de base; F1: frequência de pulsação da corrente de soldagem; A: amplitude de oscilação do arame; F2: frequência de pulsação da alimentação de arame)

Teste	Corrente de Soldagem			Pulsação do Arame		Valim (m/min)
	Ip (A)	Ib (A)	F1 (Hz)	A (mm)	F2 (Hz)	
1A	200	120	15	6	15	2,2
1B (réplica)	200	120	15	6	15	2,2
2A	160	160	0	6	15	1,7
2B (réplica)	160	160	0	6	15	1,7
3A	160	160	0	0	0	1,7
3B (réplica)	160	160	0	0	0	1,7
4A	160	160	0	0	0	2,2
4B (réplica)	160	160	0	0	0	2,2
5A	200	120	15	0	0	1,7
5B (réplica)	200	120	15	0	0	1,7

Não foi possível realizar os testes com velocidade de alimentação de arame de 2,2 m/min nas configurações de corrente constante com alimentação pulsada e de corrente pulsada com alimentação contínua, pois, nessas condições, ocorreu o contato do arame de adição com o substrato (*wire stubbing*), inviabilizando a manutenção de um processo de soldagem estável. Esse comportamento pode ser explicado pelo desequilíbrio entre a taxa de alimentação e a taxa de fusão do arame nessas condições. No caso da corrente constante (160 A) com alimentação pulsada, o avanço do arame durante os pulsos de alimentação excedeu a capacidade de fusão do processo, fazendo com que a ponta do arame atingisse repetidamente o metal de base ao fundo da poça de fusão. Já na condição de corrente pulsada com alimentação contínua, os intervalos de corrente de base (120 A) reduziram temporariamente a taxa de fusão do arame, que permaneceu sendo alimentado à velocidade de 2,2 m/min. Como consequência, o arame não foi fundido à mesma taxa em que era alimentado, permanecendo sólido ao penetrar na poça de fusão e culminando no contato de sua ponta com o metal de base, comprometendo a estabilidade do processo.

Os parâmetros de soldagem foram mantidos idênticos aos empregados nos experimentos dos capítulos anteriores, de modo a garantir a comparabilidade dos resultados ao longo da tese. Esses parâmetros são apresentados na Tabela 7.3.

Tabela 7.3 - Parâmetros constantes para avaliação do efeito da pulsação da alimentação de arame sincronizada à corrente de soldagem

Parâmetro	Valor
Distância eletrodo-peça	3 mm
Distância bocal-peça	10 mm
Distância ponta do eletrodo-bocal	7 mm
Distância arame-eletrodo	3,5 mm
Velocidade de soldagem	10 cm/min
Ângulo de alimentação do arame	30°
Vazão de gás	13 L/min
Tipo de gás	Argônio

7.2.4 Bancada Experimental

A Figura 7.1 apresenta a bancada experimental utilizada nos experimentos realizados neste capítulo. O sistema integrou os subsistemas de soldagem, alimentação de arame, movimentação da tocha, aquisição de dados e filmagem em alta velocidade, possibilitando o monitoramento das variáveis de processo e a avaliação do comportamento operacional do experimento.



Figura 7.1 - Bancada experimental utilizada, composta por alimentador de arame (1), pulsador de arame (2), fonte de soldagem IMC modelo DIGIPlus A7 (3), sistema de aquisição de dados (4), sistema de controle da mesa XYZ (5), software da câmera Tardis longo WPM (6), software da câmera Xiris WeldStudio Pro (7), câmera Tardis IGNIS MP200GS (8 – posicionada atrás do biombo) e câmera Xiris XIR-1800 (9). O detalhe apresenta a configuração da tocha TIG e do sistema de alimentação de arame utilizado.

7.2.5 Determinação da velocidade limite de alimentação do arame de adição

A velocidade máxima de alimentação do arame de adição para cada configuração foi determinada por meio de pré-testes, nos quais essa velocidade foi incrementada gradativamente a partir de valores inferiores (aproximadamente 1,0 m/min) com o arame chegando na poça de fusão. O limite operacional foi definido pela iminência do contato da ponta do arame de adição com o metal de base. Esse fenômeno foi inicialmente identificado pela presença de grandes vibrações no sistema de alimentação e confirmado por meio de filmagens em alta velocidade, que permitiram observar diretamente e com mais detalhe o comportamento do arame durante a deposição.

Para preservar margem de segurança operacional e garantir reprodutibilidade, o valor de velocidade de alimentação efetivamente adotado como limite em cada condição correspondeu a 90% do valor no qual o contato com o substrato foi observado (redução de 10% em relação ao limite identificado). Essa estratégia assegurou que todos os testes operassem no que se considerou como o limite produtivo de cada configuração, ou seja, com a máxima taxa de deposição sustentável (sob condições de energia equivalentes), possibilitando comparação direta entre os experimentos.

7.2.6 Técnicas de análise

Após a deposição, os corpos de prova foram seccionados transversalmente ao cordão de solda em três posições ao longo do trecho estabilizado da deposição, conforme ilustrado na Figura 7.2. Os cortes foram realizados nas regiões inicial, central e final do cordão, descartando-se as extremidades associadas aos efeitos transitórios de abertura e extinção do arco.

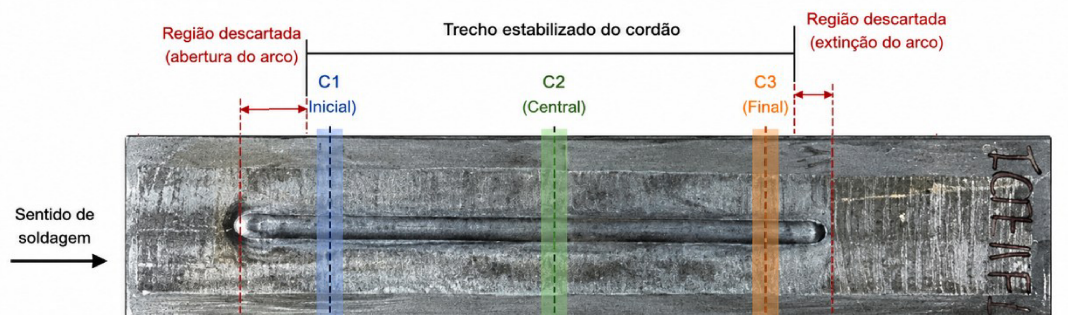


Figura 7.2 - Localização das seções transversais (C1, C2 e C3) utilizadas na caracterização geométrica dos cordões de solda. Foram descartados 25 mm e 15 mm das extremidades inicial e final do cordão de solda, respectivamente.

Após o corte, as amostras foram embutidas, lixadas e polidas segundo procedimentos metalográficos de praxe. Em seguida, as macrografias das seções transversais foram obtidas para a determinação das características geométricas dos cordões, incluindo largura, reforço, penetração e diluição. As análises realizadas são descritas a seguir.

a) Características geométricas

Todas as seções transversais foram preparadas por lixamento sequencial com lixas de granulometria 80, 120, 220, 400 e 600 mesh, seguido de ataque químico com reagente Nital 10% (10% de ácido nítrico concentrado diluído em 90% de álcool etílico) para revelação da macroestrutura. Com base nas macrografias obtidas, foram medidas a largura, o reforço, a penetração e a diluição geométrica do cordão (razão entre a área fundida do substrato e a área fundida total da secção transversal), com auxílio de software de análise de imagem ImageJ.

b) Dureza

Para avaliação das propriedades mecânicas, foram levantados perfis de microdureza Vickers ($HV_{0,5}$) em três linhas paralelas e centralizadas em cada secção transversal, conforme esquema da Figura 7.3. As medições foram realizadas desde o topo do depósito até o interior do metal de base, abrangendo a zona termicamente afetada pelo calor (ZAC). O equipamento utilizado foi um microdurômetro Shimadzu HMV-G. Essa análise foi realizada para as duas condições consideradas de maior relevância comparativa para a tese: corrente pulsada sincronizada com alimentação pulsada (1A/1B) e corrente constante com alimentação pulsada (2A/2B).

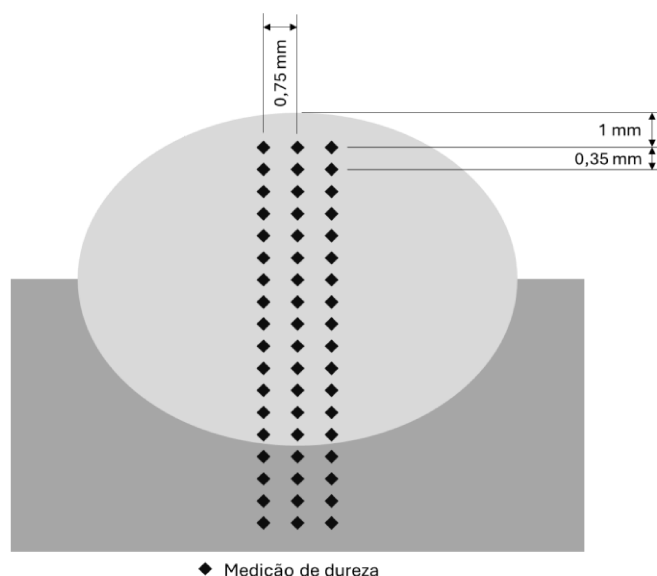


Figura 7.3 - Esquema dos pontos de medição de microdureza em cada secção transversal das peças de teste

c) Diluição química via EDS

Para avaliação da diluição química, as seções das condições 1A/1B e 2A/2B (consideradas de maior relevância comparativa para a tese) foram submetidas a análise por espectroscopia de energia dispersiva de raios-X (EDS) em um microscópio eletrônico de varredura (MEV) HITACHI TM4000Plus com módulo EDS. Em cada secção, mediu-se o perfil de composição química (teores de Cr e Ni em percentual de massa) em uma linha de medição perpendicular à superfície do substrato, partindo do depósito de maneira a alcançar a linha de fusão (interface com o metal de base – chegando na região de maior mistura com o metal de base), conforme esquema da Figura 7.4. A comparação com a composição de referência do arame (Tabela 7.1) permite quantificar a perda de elementos nobres por diluição com o metal de base.

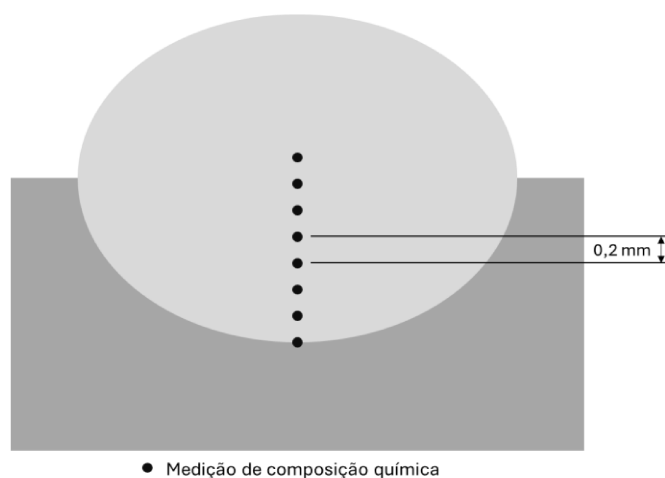


Figura 7.4 - Esquema dos pontos de medição de composição química em cada secção transversal das peças de teste

Esse levantamento de composição química foi realizado em uma linha de medição por secção como ilustrado na Figura 7.4 de maneira a alcançar a linha de fusão (interface com o metal de base – chegando na região de maior mistura com o metal de base) e assim verificar possível efeito da pulsação da alimentação de arame sincronizada à pulsação da corrente em termos de distribuição e conservação da presença dos elementos químicos principais adicionados.

d) Balanço de fases por análise de imagem

Para avaliação da microestrutura e do balanço ferrita/austenita, as secções das condições 1A/1B e 2A/2B (consideradas de maior relevância comparativa para a tese) foram adicionalmente preparadas com lixas de granulometria 800 e 1000 mesh, seguidas de polimento com aluminas de 1 μm e 0,5 μm . Em seguida, tais amostras foram atacadas com reagente Beraha (60 mL de água, 30 mL de HCl e 0,75 g de metabissulfito de potássio) por aproximadamente 10 segundos. O percentual de ferrita (e austenita) em cada secção foi determinado por análise de imagens obtidas em microscópio ótico ZEISS AXIO Imager.M2m com ampliação de 500 vezes, com quinze imagens por secção distribuídas em três níveis (topo, meio e fundo do depósito), conforme ilustrado na Figura 7.5. As imagens foram processadas no software livre ImageJ, permitindo a determinação do percentual de ferrita e, conseqüentemente, do balanço ferrita/austenita em cada condição avaliada pelo método de análise imagem padrão, como ilustrado na Figura 7.6. Essa estratégia possibilitou observar os efeitos da pulsação da alimentação de arame sincronizada com a pulsação da corrente sobre a formação das fases principais do metal depositado. A presença de fases deletérias, frequentemente associadas aos aços inoxidáveis duplex e superduplex, não foi investigada, uma vez que as condições empregadas envolveram apenas um único passe de deposição, sem ciclos de reaquecimento, e níveis de energia relativamente baixos, não sendo assim esperada a formação significativa dessas fases.

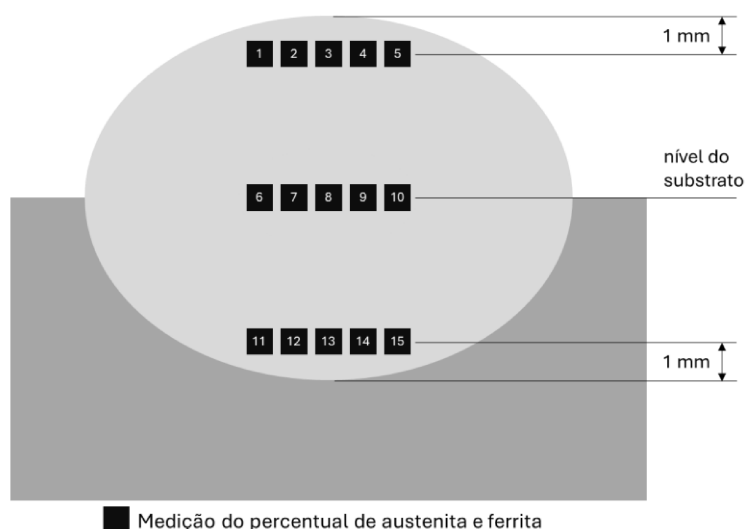


Figura 7.5 - Esquema dos locais de medição de percentual de fases (balanço austenita/ferrita) em cada secção transversal das peças de teste

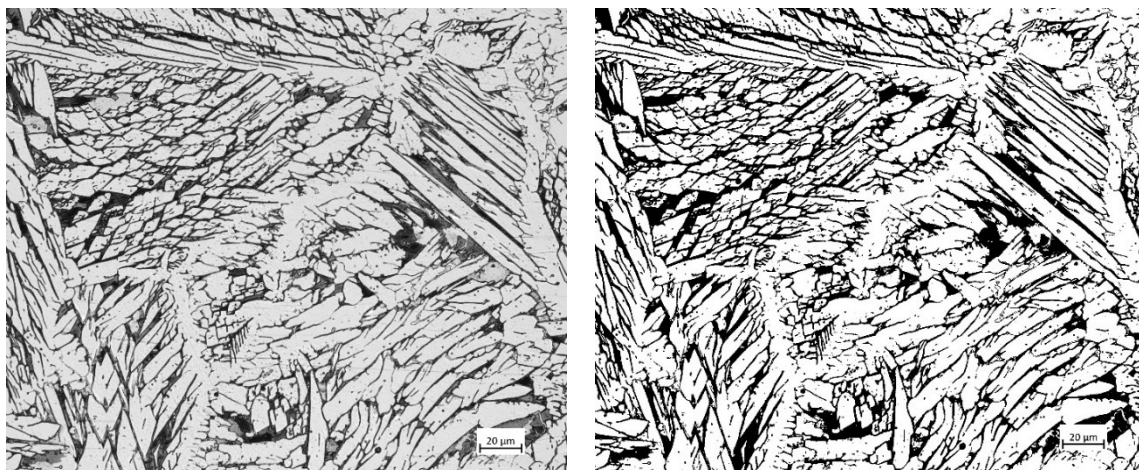


Figura 7.6 - Exemplo de imagem (ampliação de 500 vezes) processada digitalmente para medição do balanço de fases (área escura = ferrita; área clara = austenita): (esq.) imagem original da microscopia ótica (escala de cinza); (dir.) imagem em preto e branco para determinação da área ocupada pelas fases

e) Análise termográfica

Para a avaliação dos aspectos térmicos do processo de deposição, empregou-se uma câmera termográfica de alta velocidade modelo XIR-1800 em conjunto com o software WeldStudio Pro, ambos da Xiris Automation. O sistema permitiu o registro contínuo dos campos de temperatura durante a deposição, possibilitando a análise de parâmetros térmicos ao longo do cordão. Cabe ressaltar que não foi possível avaliar os casos das réplicas das duas condições de deposição principais em função de problemas nos arquivos de aquisição dos dados térmicos. Até por essa razão, optou-se por realizar as medições térmicas tanto no meio quanto ao fim dos cordões das condições de deposição principais.

Quatro ferramentas do software WeldStudio Pro foram utilizadas para a extração dos dados termográficos e são descritas a seguir.

(i) Tempo de resfriamento – ferramenta *Cooling Time*

A ferramenta *Cooling Time* determina o tempo que leva para uma região da imagem resfriar de uma temperatura especificada para outra, por meio da identificação automática de quando a região de interesse passa pelas temperaturas limites da faixa alvo, apresentando a diferença média dos instantes de tempo decorridos nessa faixa. A partir do tempo de resfriamento assim determinado e da diferença de temperatura da faixa alvo (400 °C no presente caso), calculou-se a taxa de resfriamento média. Os limites adotados para a faixa de temperatura foram 1000 °C e 600 °C. O trecho de medição correspondeu a uma região retangular de 35 mm de comprimento (longitudinal ao cordão) posicionada na altura média do depósito, iniciada a 10 mm atrás da linha média do eletrodo de tungstênio, e subdividida em três linhas paralelas para determinação do tempo médio. As medições foram realizadas do meio e ao final da deposição.

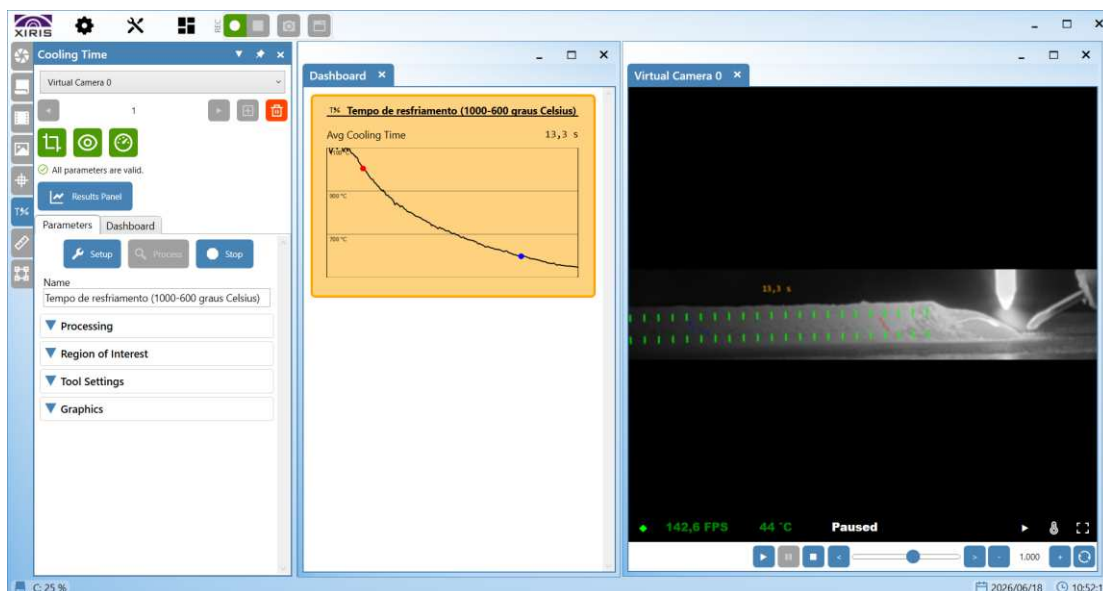


Figura 7.7 - Ferramenta Cooling Time do software WeldStudio Pro: medição do tempo de resfriamento entre 1000 °C e 600 °C em região retangular de 35 mm de comprimento iniciada a 10 mm atrás da linha média do eletrodo de tungstênio (tempo de resfriamento).

(ii) Temperatura na poça de fusão – ferramenta *Advanced Pixel Reader*

A temperatura mínima na poça de fusão foi monitorada com a ferramenta *Advanced Pixel Reader* (Figura 7.8), que captura dados de temperatura em uma região retangular definida pelo usuário. Adotou-se a temperatura mínima como parâmetro de análise, pois a temperatura máxima extrapolou em vários momentos a faixa de calibração da câmera (350 °C a 1500 °C). A região de medição correspondeu a uma janela de 10 × 10 pixels (0,086 mm/pixel), posicionada de forma centralizada a 2 mm atrás da linha média do eletrodo de tungstênio e 1 mm acima da superfície da chapa. Medições foram realizadas do meio e ao final do cordão.

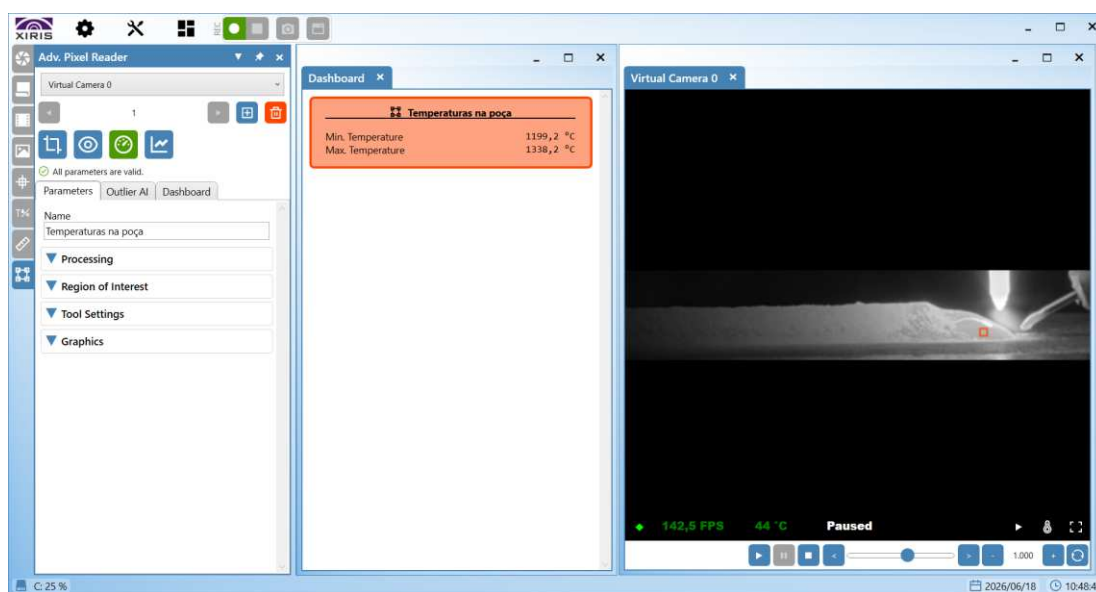


Figura 7.8 - Ferramenta Advanced Pixel Reader do software WeldStudio Pro: medição da temperatura mínima em região de 10 × 10 pixels na poça de fusão, centralizada a 2 mm atrás da linha média do eletrodo de tungstênio e 1 mm acima da chapa (temperatura mínima da poça de fusão).

(iii) Temperatura logo atrás da poça – ferramenta *Pixel Reader*

A temperatura imediatamente atrás da poça de fusão foi obtida com a ferramenta *Pixel Reader* (Figura 7.9), que captura a temperatura de um ponto (pixel de $0,086 \times 0,086$ mm) específico da imagem térmica. O ponto foi posicionado na meia altura do depósito, a 10 mm atrás da linha média do eletrodo de tungstênio, correspondendo a um ponto imediatamente posterior à solidificação do material do cordão. Medições foram realizadas do meio e ao final do cordão.

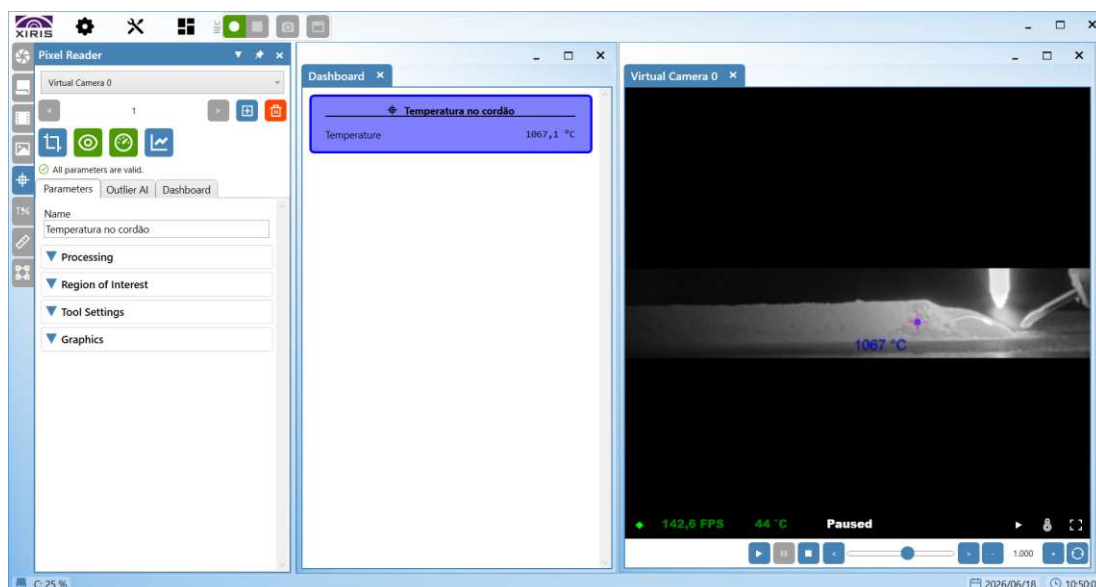


Figura 7.9 - Ferramenta Pixel Reader do software WeldStudio Pro: medição da temperatura em ponto selecionado na meia altura do depósito e a 10 mm atrás da linha média do eletrodo de tungstênio (temperatura logo atrás da poça de fusão).

(iv) Dimensões da poça de fusão – ferramenta *Measure*



Figura 7.10 - Ferramenta Measure do software WeldStudio Pro: medição de comprimento da poça de fusão com calibração pelo diâmetro do eletrodo de tungstênio.

Os comprimentos da poça de fusão (frontal e traseiro a partir da linha média do eletrodo de tungstênio e delimitados pela fronteira fundido/sólido da imagem) foram medidos com a ferramenta *Measure* (Figura 7.10), que permite determinar distâncias na imagem após calibração por uma dimensão conhecida, que no caso foi realizada com o diâmetro do eletrodo de tungstênio, visível na imagem termográfica. Para cada condição, o arame estava retraído junto ao bico de alimentação para facilitar a visualização da porção frontal da poça e manter um padrão para o momento de medição em relação ao processo. Foram realizadas dez medições por condição: cinco no meio e cinco ao final do cordão, com cálculo dos valores médios e desvios-padrão de cada grupo.

7.3 Resultados e Discussão

7.3.1 Capacidade de deposição e estabilidade operacional

A determinação da velocidade de alimentação limite revelou diferença significativa entre as configurações avaliadas. A condição de corrente pulsada sincronizada com alimentação pulsada (1A/1B) permitiu alcançar uma velocidade de alimentação de arame de 2,2 m/min, resultando em uma capacidade de deposição aproximadamente 30% superior à registrada para a condição de corrente constante com alimentação pulsada (2A/2B – velocidade de alimentação limite em 1,7 m/min), operando com parâmetros equivalentes de energia de soldagem. Esse resultado é diretamente coerente com a premissa do sistema de sincronismo desenvolvido no Capítulo VI: ao aplicar a corrente de pico quando o arame está em contato com a poça de fusão, maximiza-se a fusão do metal de adição nesse instante e viabiliza-se a operação em velocidades de alimentação que seriam impraticáveis sem o sincronismo.

A Figura 7.11, que apresenta o oscilograma de corrente de soldagem, tensão do arco e tensão eletrodo-arames, acompanhados de imagens de alta velocidade capturadas em instantes representativos do processo, para a condição 1A (corrente pulsada sincronizada com alimentação pulsada a 2,2 m/min), evidencia a natureza cíclica e coordenada do processo: a corrente alterna entre ~120 A (base) e ~200 A (pico) em frequência compatível com a pulsação do arame. As imagens de alta velocidade (quadros 1 a 4) registram as distintas fases do ciclo: (1) avanço do arame, (2) contato com a poça, (3) recuo e (4) reinício do ciclo, confirmando que o contato ocorre durante a fase de pico de corrente.

Nota-se, por meio do sinal da tensão eletrodo-arames (V_{EA}), que a corrente permanece sincronizada com o movimento do arame. Observa-se ainda que, em razão da maior velocidade de alimentação, o arame permanece por um intervalo de tempo mais longo em contato ou muito próximo da interface poça/arco. Esse comportamento é evidenciado pelo aumento da fração do ciclo em que a V_{EA} permanece em níveis próximos de 10 V, em comparação com o intervalo em que assume valores próximos de 5 V. Além disso, identifica-se uma pequena latência de aproximadamente 10 ms entre a variação da V_{EA} e a resposta da corrente, o que atribuído ao tempo de resposta da fonte de soldagem.

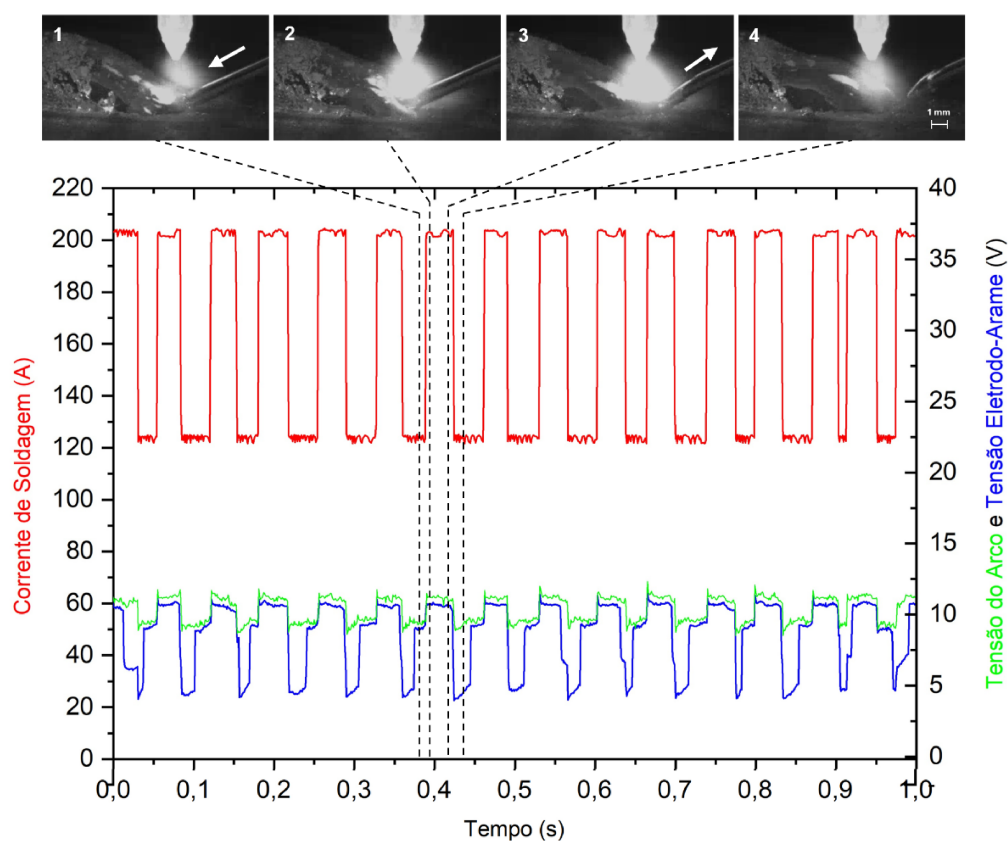


Figura 7.11 - Oscilogramas de corrente, tensão do arco e tensão eletrodo-aramé com imagens de alta velocidade em instantes representativos: condição 1A (corrente pulsada sincronizada com alimentação pulsada a 2,2 m/min) (imagens obtidas pela câmera Tardis).

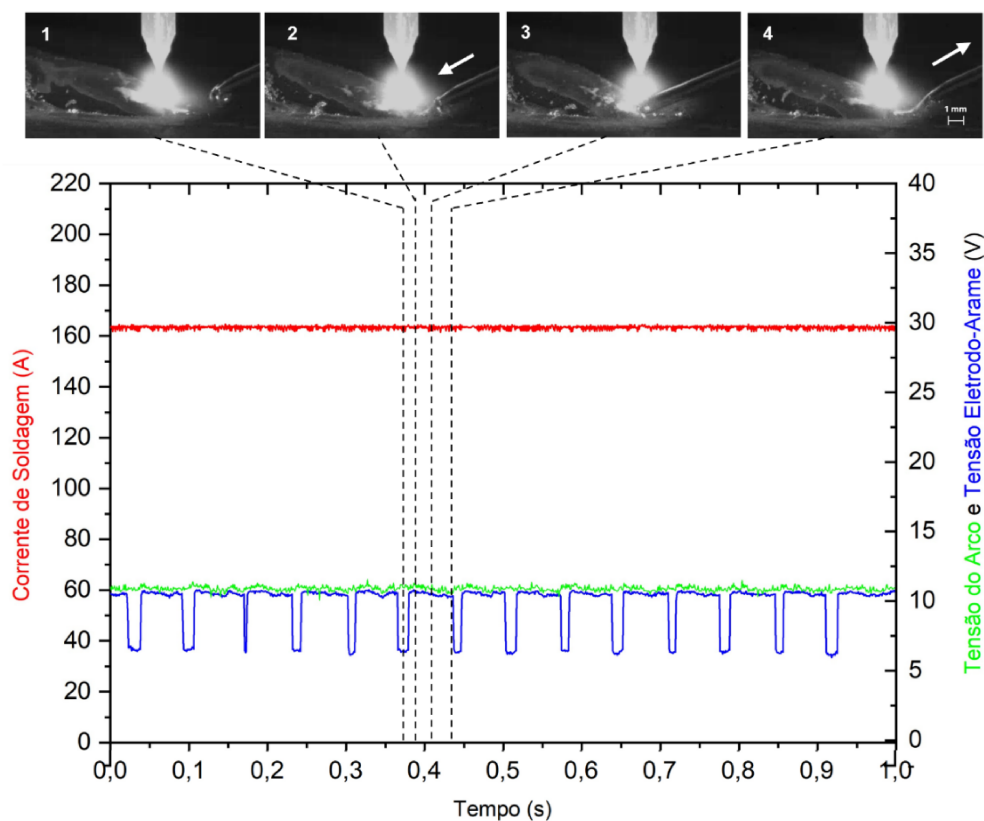


Figura 7.12 - Oscilogramas de corrente, tensão do arco e tensão eletrodo-aramé com imagens de alta velocidade em instantes representativos: condição 2A (corrente constante com alimentação pulsada a 1,7 m/min) (imagens obtidas pela câmera Tardis).

A Figura 7.12, correspondente à condição 2A (corrente constante com alimentação pulsada a 1,7 m/min), contrasta diretamente com a anterior. A corrente se mantém constante em ~160 A ao longo de todo o ciclo, sem qualquer modulação temporal. Os quadros revelam o movimento oscilatório do arame, mas neste caso, o contato com a poça ocorre sem o suporte da corrente de pico, resultando em menor aporte energético local no instante de fusão. Os níveis baixos na tensão eletrodo-arame (azul) continuam presentes, porém menos profundos e com maior irregularidade temporal comparativamente à condição sincronizada, o que indica instabilidade no processo de fusão e transferência. Essa distinção operacional é diretamente responsável pelo limite de velocidade de alimentação inferior (1,7 m/min) em relação à condição 1A/1B (2,2 m/min).

A Figura 7.13, referente à condição 3A (corrente constante com alimentação contínua a 1,7 m/min), apresenta comportamento elétrico marcadamente distinto das condições anteriores. Ambas as curvas de corrente (vermelho), tensão do arco (verde) e tensão eletrodo-arame (azul) exibem elevada estabilidade ao longo de todo o intervalo de 1,0 s, sem oscilações periódicas discerníveis. As imagens de alta velocidade, mostram o arame avançando de forma contínua em direção à poça, sem ciclos de retração. Nessas condições, a transferência metálica se dá de maneira relativamente homogênea, porém sem o mecanismo de modificação energética que a pulsação (seja da corrente ou do arame) pode proporcionar. A imagem correspondente à condição 4A (corrente constante com alimentação contínua a 2,2 m/min) não é apresentada, por apresentar características visuais muito semelhantes às observadas na condição 3A.

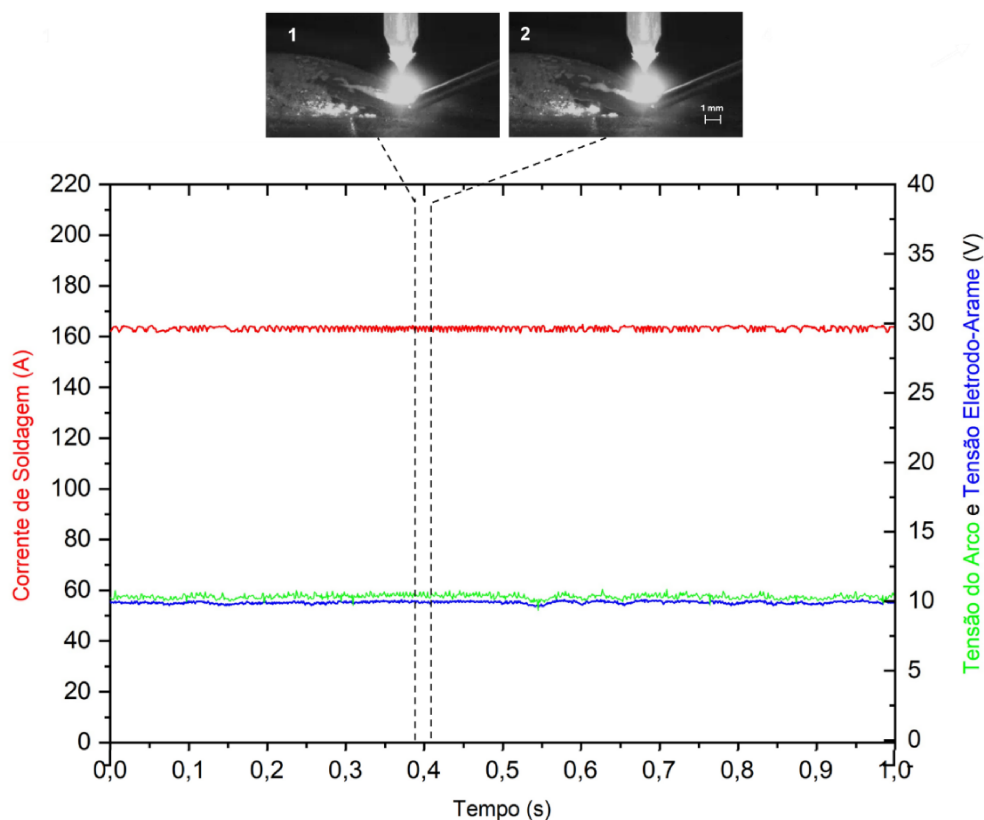


Figura 7.13 - Oscilogramas de corrente, tensão do arco e tensão eletrodo-arame com imagens de alta velocidade em instantes representativos: condição 3A (corrente constante com alimentação contínua a 1,7 m/min) (imagens obtidas pela câmera Tardis).

A Figura 7.14, relativa à condição 5A (corrente pulsada com alimentação contínua a 1,7 m/min), ilustra um regime intermediário: a corrente pulsa entre ~122 A e ~202 A em frequência regular, porém o arame é alimentado de forma contínua. As imagens de alta velocidade mostram que a ponta do arame permanece em posição relativamente estacionária, sem oscilações periódicas. Os pulsos de corrente induzem variações de menor amplitude na tensão eletrodo-arame (azul), registradas como ondulações suaves e não como as diferenças de níveis acentuadas observadas nas condições com alimentação pulsada.

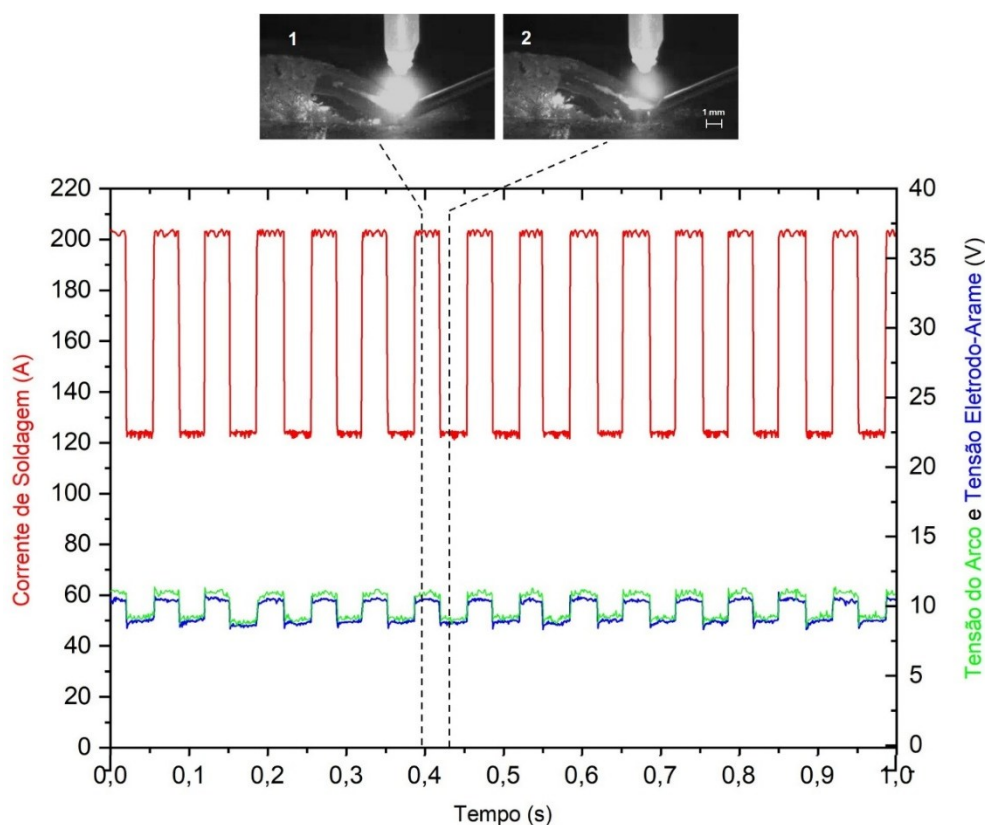


Figura 7.14 - Oscilogramas de corrente, tensão do arco e tensão eletrodo-arame com imagens de alta velocidade em instantes representativos: condição 5A (corrente pulsada com alimentação contínua a 1,7 m/min) (imagens obtidas pela câmera Tardis).

Como não foi possível realizar os ensaios da condição de corrente pulsada com alimentação contínua na velocidade de alimentação de 2,2 m/min, a Figura 7.15 apresenta uma sequência de quadros extraídos da filmagem em alta velocidade, ilustrando o mecanismo responsável pela instabilidade observada. Nesse caso, o arame de adição acaba atravessando a poça sem fusão suficiente, permanecendo no estado sólido até atingir o substrato no fundo da poça. Como consequência, o arame acaba sendo desviado lateralmente, caracterizando a perda da transferência metálica adequada e evidenciando a condição de instabilidade do processo. Essa ocorrência demonstra que a pulsação da corrente, isoladamente, não foi suficiente para ampliar o limite operacional do processo. Em contrapartida, evidencia que o aumento da capacidade de fusão do metal de adição depende da atuação conjunta da pulsação da corrente e da pulsação

sincronizada da alimentação de arame, estratégia que possibilitou elevar a velocidade de alimentação sem a ocorrência desse tipo de instabilidade.

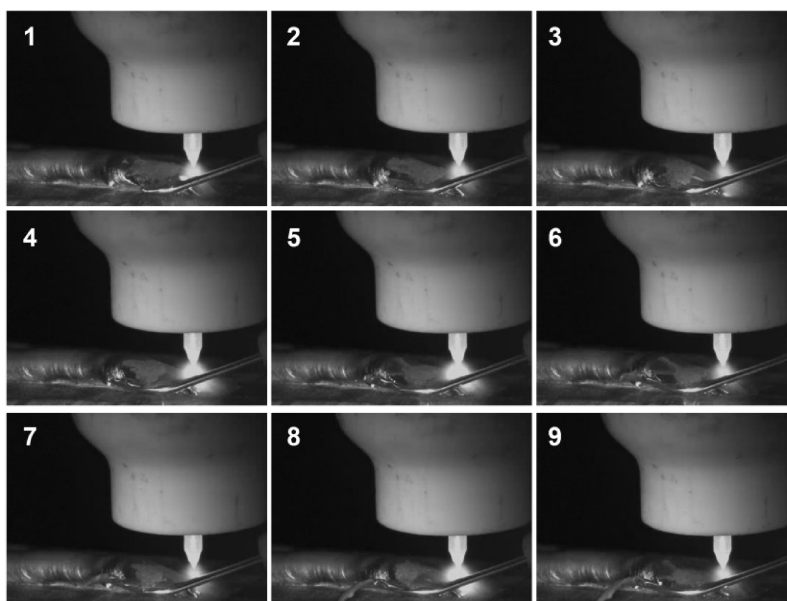


Figura 7.15 - Sequência de imagens obtidas por filmagem em alta velocidade (imagens obtidas pela câmera Tardis à 200 fps), com intervalos de 10 frames entre quadros consecutivos, mostrando a ocorrência de falta de fusão do arame na condição de corrente pulsada ($I_p = 200$ A e $I_b = 120$ A) com alimentação contínua a 2,2 m/min.

Assim, os resultados comparativos da operacionalidade das condições de teste avaliadas indicam que a estratégia de sincronismo proposta foi eficaz para ampliar o envelope operacional do processo, permitindo operar com maiores velocidades de alimentação sem ocorrência de instabilidades. Em particular, em relação à condição com corrente constante e alimentação pulsada de arame, o sincronismo possibilitou o emprego de maiores velocidades de alimentação e, conseqüentemente, o aumento da capacidade de deposição do processo.

7.3.2 Características geométricas dos cordões

Antes da apresentação dos resultados relativos à geometria do cordão, a Tabela 7.4 sintetiza os parâmetros de processo empregados em cada condição experimental, incluindo os valores médios de corrente, tensão, potência, energia de soldagem e a permanência do arame na fonte térmica (PAFT), que mede o percentual de tempo médio com o arame em acoplamento com a poça/arco em cada ciclo (conforme explicado na seção 6.4.2). A inclusão desses dados energéticos e operacionais é necessária para subsidiar a interpretação física das variações geométricas discutidas a seguir, uma vez que a largura, o reforço, a penetração e a diluição do cordão resultam diretamente da forma como a energia disponibilizada pelo arco é distribuída entre a fusão do metal de base e a fusão do metal (arame) de adição.

Tabela 7.4 - Parâmetros de processo empregados nas condições experimentais. I: corrente de soldagem média; V: tensão do arco média; P: potência instantânea média; E: energia de soldagem; V_{EA} : tensão eletrodo-aramé média; PAFT: permanência do arame na fonte térmica.

Teste	Valim (m/min)	I (A) Média	V (V) Média	P (W) Média	E (J/mm)	VEA (V) Média	PAFT
1A	2,2	169	10,5	1799	1079	8,5	76%
1B (réplica)	2,2	174	10,2	1786	1072	9,1	97%
2A	1,7	163	10,8	1763	1058	9,3	90%
2B (réplica)	1,7	163	10,7	1745	1047	8,4	68%
3A	1,7	163	10,3	1672	1003	9,2	100%
3B (réplica)	1,7	163	10,4	1701	1021	9,4	100%
4A	2,2	163	10,3	1675	1005	9,2	100%
4B (réplica)	2,2	163	9,9	1611	967	8,7	100%
5A	1,7	163	10,2	1691	1015	9,2	100%
5B (réplica)	1,7	162	10,7	1786	1072	9,6	100%

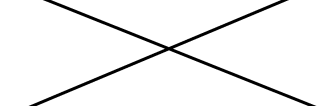
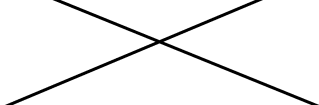
A Tabela 7.5 reúne os resultados médios das medições geométricas obtidos para todas as condições avaliadas. Os valores representam as médias das três seções transversais por amostra, com os desvios-padrão indicando a variabilidade ao longo do comprimento dos cordões.

Tabela 7.5 - Características geométricas médias ($\pm$ desvio-padrão) dos cordões depositados.

Teste	Largura (mm)	Reforço (mm)	Penetração (mm)	Diluição (%)
1A	8,12 $\pm$ 0,42	5,33 $\pm$ 0,10	1,46 $\pm$ 0,03	18,7 $\pm$ 1,5
1B (réplica)	8,15 $\pm$ 0,51	5,38 $\pm$ 0,07	1,66 $\pm$ 0,33	21,4 $\pm$ 2,8
2A	8,05 $\pm$ 0,31	4,34 $\pm$ 0,09	1,83 $\pm$ 0,21	26,8 $\pm$ 2,0
2B (réplica)	7,43 $\pm$ 0,43	4,67 $\pm$ 0,05	2,39 $\pm$ 0,16	31,1 $\pm$ 1,5
3A	7,73 $\pm$ 0,30	5,30 $\pm$ 0,06	1,23 $\pm$ 0,07	16,8 $\pm$ 0,2
3B (réplica)	5,80 $\pm$ 0,71	5,68 $\pm$ 0,27	1,06 $\pm$ 0,40	11,6 $\pm$ 4,5
4A	7,79 $\pm$ 0,37	4,19 $\pm$ 0,36	2,03 $\pm$ 0,07	27,3 $\pm$ 2,0
4B (réplica)	8,10 $\pm$ 0,34	4,46 $\pm$ 0,07	1,47 $\pm$ 0,06	22,5 $\pm$ 1,0
5A	7,77 $\pm$ 0,21	4,64 $\pm$ 0,15	1,88 $\pm$ 0,09	24,3 $\pm$ 1,6
5B (réplica)	8,54 $\pm$ 0,05	4,29 $\pm$ 0,06	2,20 $\pm$ 0,05	31,1 $\pm$ 1,2

De acordo com a Tabela 7.6, a análise visual das macrografias atestou ausência de poros relevantes em todas as condições avaliadas, independentemente da configuração de pulsação adotada. Esse resultado é consistente com o observado na seção 5.4.5, onde se verificou que a incidência de porosidade diminuiu progressivamente com o aumento da frequência de pulsação do arame (de maior ocorrência em 2 Hz para ausência total em 20 Hz), efeito atribuído à maior agitação da poça e à consequente facilitação da expulsão de gases antes da solidificação. Os ensaios do presente capítulo foram conduzidos a 15 Hz, frequência situada na faixa de maior agitação, o que, combinado com a agitação adicional promovida pela pulsação sincronizada da corrente de soldagem, pode ter contribuído para a ausência de porosidade mesmo nas condições de maior velocidade de alimentação (2,2 m/min).

Tabela 7.6 - Macrografias das seções transversais dos cordões depositados (ataque: Nital 10%).
A condição de corrente pulsada com alimentação contínua não foi realizada a 2,2 m/min.

		Corrente de Soldagem (A)		
		160 A	$I_p = 200 \text{ A} - I_b = 120 \text{ A}$	
Alimentação Pulsada (A = 6 mm – F = 15 Hz)	2A		1A	
	Va = 1,7 m/min	5 mm	Va = 2,2 m/min	5 mm
	2B		1B	
	Va = 1,7 m/min	5 mm	Va = 2,2 m/min	5 mm
Alimentação Contínua	3A		5A	
	Va = 1,7 m/min	5 mm	Va = 1,7 m/min	5 mm
	3B		5B	
	Va = 1,7 m/min	5 mm	Va = 1,7 m/min	5 mm
	4A			
	Va = 2,2 m/min	5 mm		
	4B			
	Va = 2,2 m/min	5 mm		

A comparação entre as condições 1A/1B e 2A/2B evidencia o efeito positivo do sincronismo entre a pulsação da corrente e a alimentação de arame sobre a formação do cordão. Mesmo operando sob condições energéticas equivalentes (energia de soldagem equivalente, conforme Tabela 7.4), a condição sincronizada permitiu trabalhar com maior velocidade de alimentação de arame, resultando em maior volume de material adicionado à poça de fusão. Como consequência, observou-se aumento da largura e do reforço do cordão em relação às condições com corrente constante e alimentação pulsada, conforme ilustrado nas Figuras 7.16 e 7.17.

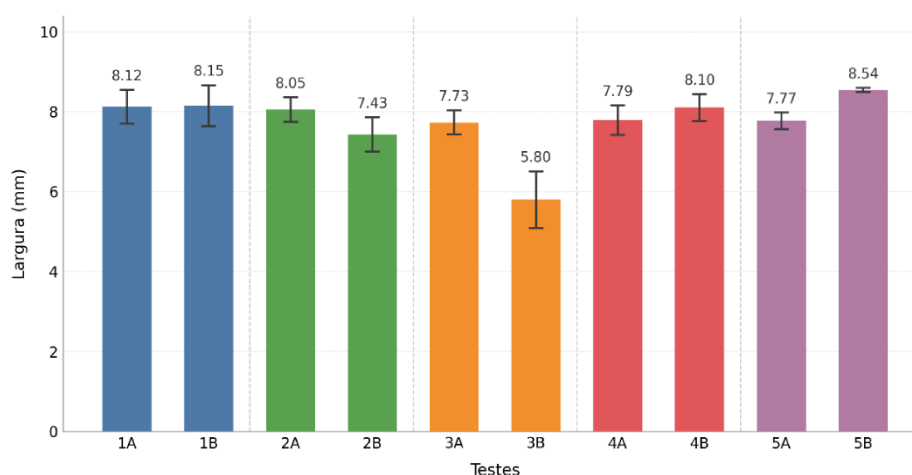


Figura 7.16 - Largura do cordão em função da condição experimental.

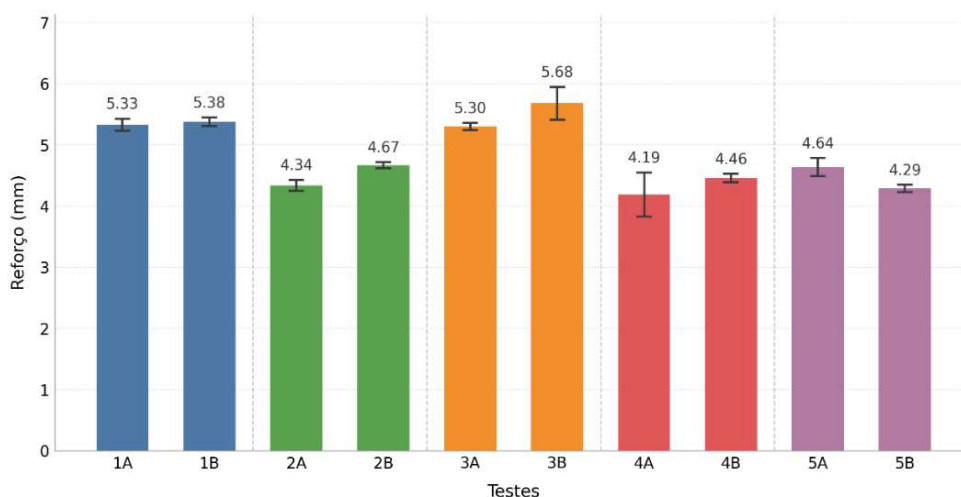


Figura 7.17 - Reforço do cordão em função da condição experimental.

Em contrapartida, conforme apresentado nas Figuras 7.18 e 7.19, verificou-se redução da penetração e da diluição nas condições sincronizadas. Embora a energia de soldagem tenha permanecido praticamente constante, o maior volume de metal de adição introduzido na poça de fusão favoreceu uma fusão mais superficial do material, reduzindo a fração de energia disponível para a fusão do metal de base. Como consequência, houve menor penetração e menor participação do metal de base na composição do depósito, refletida nos menores valores de diluição observados nos testes sincronizados (1A: 18,7%; 1B: 21,4%) em comparação à condição de corrente constante com alimentação pulsada (2A: 26,8%; 2B: 31,1%). Esse comportamento indica que a estratégia sincronizada favorece um gerenciamento mais eficiente da energia disponível, direcionando uma maior parte do aporte térmico para a fusão do arame de adição e reduzindo a parcela que é efetivamente transferida ao metal de base. Além disso, os resultados sugerem maior repetibilidade geométrica entre as réplicas no caso da sincronização, possivelmente em função do maior controle sobre a interação entre arame, arco e poça de fusão neste caso.

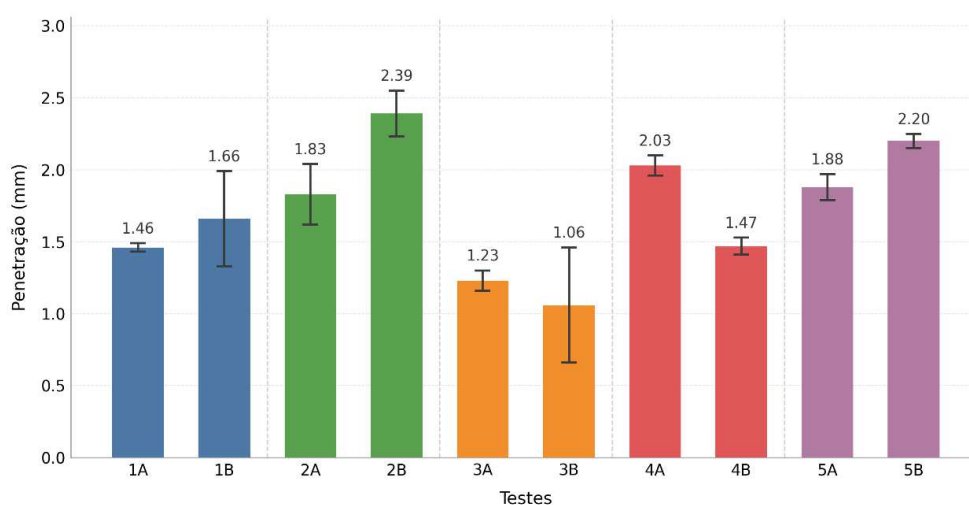


Figura 7.18 - Penetração do cordão em função da condição experimental.

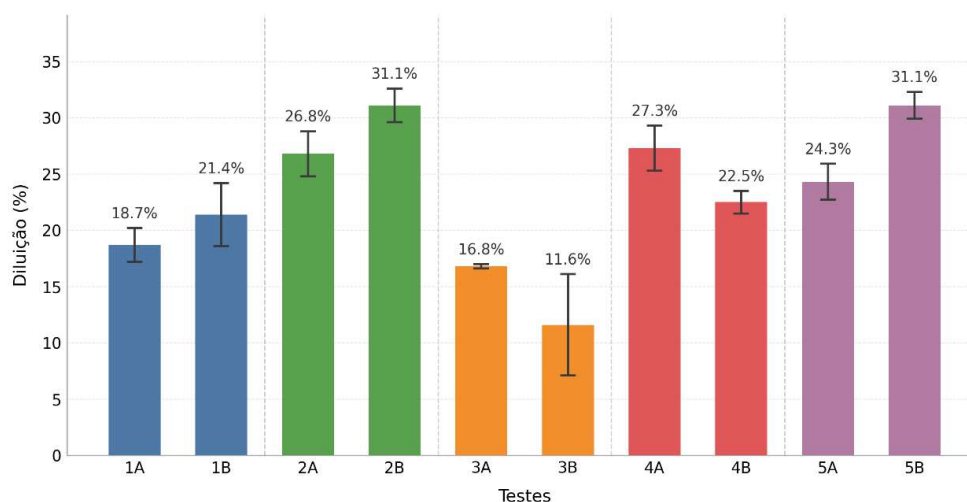


Figura 7.19 - Diluição do cordão em função da condição experimental.

Esses resultados evidenciam que a estratégia de sincronismo permite aumentar a taxa de deposição sem elevar a diluição. Essa condição é especialmente favorável para aplicações de revestimento, pois possibilitaria a obtenção de cordões mais largos e com maior reforço, mantendo baixos níveis de diluição. Como consequência, poderia se aumentar a área coberta por passe e preservar, em maior grau, as características químicas e metalúrgicas do material depositado. Em manufatura aditiva por arco, a mesma lógica poderia ser explorada para poder utilizar uma maior taxa de deposição por camada, melhorar o controle térmico das camadas previamente depositadas e conseguir uma formação de paredes mais regulares e estáveis. Para aplicações de união, a redução da penetração poderia não ser desejável em todos os casos, mas o controle proporcionado pelo sincronismo pode ser vantajoso quando se busca limitar a diluição, controlar o aporte térmico ou realizar passes de enchimento e acabamento com maior estabilidade geométrica.

Nos casos 3A/3B, os resultados apresentaram elevada dispersão, principalmente na diluição (Figura 7.19), sugerindo menor repetibilidade da condição experimental. Para o caso 3B, em especial, que apresentou o maior desvio padrão, a ausência de pulsação da alimentação de arame pode ter reduzido o controle sobre a interação entre arame, arco e poça de fusão, o que pode ter contribuído para a maior instabilidade geométrica resultante.

A comparação entre a condição de corrente pulsada sincronizada com alimentação pulsada (testes 1A/1B) e a condição convencional de corrente constante com alimentação contínua (testes 4A/4B), ambas conduzidas na mesma velocidade de alimentação (2,2 m/min), evidencia a influência direta da sincronização sobre a geometria do depósito: a condição 1A/1B apresentou reforço médio de 5,36 mm contra 4,33 mm da condição 4A/4B (incremento de aproximadamente 24%), ao mesmo tempo em que a diluição foi reduzida de 24,9% para 20,1% e a penetração de 1,75 mm para 1,56 mm. Na condição convencional (4A/4B), o arco atua ininterruptamente sobre a poça e o metal de base com energia constante ao longo de todo o ciclo de deposição, e o arame alimenta continuamente a zona de fusão sem variação geométrica ou térmica, resultando em distribuição estacionária de calor entre arame e substrato, com maior fração de energia transferida para o metal

de base. Na condição sincronizada (1A/1B), a modulação conjunta da corrente e do movimento do arame introduz um mecanismo de dosagem temporal do aporte térmico: durante o avanço, a ponta do arame entra na região da fonte térmica (arco/poça de fusão) coincidindo com a corrente de pico, absorvendo a máxima energia disponível para sua fusão e depositando maior volume de material como reforço; durante o recuo, a corrente de base reduz simultaneamente a energia do arco e o arame se afasta da região da fonte térmica, limitando o calor transferido ao substrato. Resultado parcialmente análogo foi verificado por Jorge et al. (2018) no processo TIG com pulsação da alimentação de arame frio, onde mesmo sem qualquer sincronização com os parâmetros elétricos, apenas a pulsação do arame na região do arco resultou em cordão com maior reforço. No presente trabalho, a adição do controle sincronizado da corrente potencializou esse efeito geométrico ao garantir que o instante de máxima energia do arco coincida com o avanço do arame, transformando um acoplamento passivo em mecanismo de controle ativo do aporte térmico por ciclo de deposição.

Ainda considerando as médias entre cada teste e sua respectiva réplica, a condição 5A/5B (corrente pulsada, alimentação contínua, $V_a = 1,7$ m/min) apresentou penetração média de 2,04 mm e diluição média de 27,7%, valores superiores aos obtidos na condição 3A/3B (corrente constante, alimentação contínua, $V_a = 1,7$ m/min), cujas médias foram de 1,15 mm e 14,2%, respectivamente. Esses resultados foram também superiores aos observados na condição sincronizada 1A/1B ($V_a = 2,2$ m/min), que, operando com velocidade de alimentação aproximadamente 30% maior, apresentou penetração média de 1,56 mm e diluição média de 20,1%. Embora a diferença de velocidade de alimentação deva ser considerada na interpretação (uma vez que a condição 1A/1B direciona maior fração da mesma energia total para a fusão do arame), o resultado reforça que a combinação entre maior velocidade de alimentação e sincronização da corrente contribuiu para limitar a fusão do metal de base, direcionando parcela crescente da energia disponível para a fusão do metal de adição.

De forma geral, os resultados reforçam a vantagem da estratégia com pulsação sincronizada entre corrente e alimentação de arame. Tal condição apresentou melhor controle sobre a formação do cordão, maior capacidade de deposição, menor penetração e menor diluição, características desejáveis especialmente para aplicações em revestimento e manufatura aditiva, nas quais se busca aumentar a produtividade (incremento de forma) por depósito, melhorar a estabilidade geométrica do depósito, e preservar o metal de base ou camada anterior.

7.3.3 Dureza

Os valores de microdureza Vickers ($HV_{0,5}$) obtidos nas seções transversais das amostras 1A/1B e 2A/2B (condições principais para comparação) são apresentados nas Tabelas de 7.7 a 7.10.

Tabela 7.7 - Microdureza Vickers ($HV_{0,5}$) em cada uma das secções avaliadas em função da posição (linhas) dentro dos depósitos obtidos com corrente pulsada sincronizada com alimentação pulsada (velocidade de alimentação = 2,2 m/min) (teste 1A)

Amostra 1A = corrente pulsada sincronizada com alimentação pulsada (velocidade de alimentação = 2,2 m/min)													
Ponto ↓	Secção transversal												Média geral (HV) ↓
	1				2				3				
	Linha 1 (HV)	Linha 2 (HV)	Linha 3 (HV)	Média (HV)	Linha 1 (HV)	Linha 2 (HV)	Linha 3 (HV)	Média (HV)	Linha 1 (HV)	Linha 2 (HV)	Linha 3 (HV)	Média (HV)	
1	232	227	221	226,7	244	229	227	233,3	229	239	233	233,7	231
2	235	231	229	231,7	232	227	213	224,0	247	241	240	242,7	233
3	217	219	237	224,3	226	228	225	226,3	236	226	247	236,3	229
4	225	229	222	225,3	226	234	212	224,0	235	233	228	232,0	227
5	217	223	218	219,3	221	214	225	220,0	222	215	233	223,3	221
6	222	227	226	225,0	215	208	221	214,7	222	229	226	225,7	222
7	217	224	223	221,3	217	230	219	222,0	225	222	218	221,7	222
8	223	231	219	224,3	216	208	223	215,7	217	225	218	220,0	220
9	222	229	223	224,7	227	219	210	218,7	217	224	216	219,0	221
10	217	224	230	223,7	221	231	224	225,3	214	216	226	218,7	223
11	232	226	219	225,7	231	225	226	227,3	225	221	212	219,3	224
12	225	223	228	225,3	219	239	211	223,0	217	243	226	228,7	226
13	221	216	220	219,0	240	251	184	225,0	241	229	228	232,7	226
14	183	177	175	178,3	166	164	163	164,3	176	191	180	182,3	175
15	176	169	172	172,3	162	160	163	161,7	173	170	178	173,7	169
16	159	162	166	162,3	156	161	164	160,3	164	164	166	164,7	162
17	156	166	161	161,0	152	155	158	155,0	164	155	164	161,0	159
18	154	154	160	156,0	143	142	144	143,0	168	159	156	161,0	153

Tabela 7.8 - Microdureza Vickers ($HV_{0,5}$) em cada uma das secções avaliadas em função da posição (linhas) dentro dos depósitos obtidos com corrente pulsada sincronizada com alimentação pulsada (velocidade de alimentação = 2,2 m/min) (teste 1B – réplica)

Amostra 1B = corrente pulsada sincronizada com alimentação pulsada (velocidade de alimentação = 2,2 m/min) (réplica)													
Ponto ↓	Secção transversal												Média geral (HV) ↓
	1				2				3				
	Linha 1 (HV)	Linha 2 (HV)	Linha 3 (HV)	Média (HV)	Linha 1 (HV)	Linha 2 (HV)	Linha 3 (HV)	Média (HV)	Linha 1 (HV)	Linha 2 (HV)	Linha 3 (HV)	Média (HV)	
1	224	225	242	230,3	228	238	222	229,3	223	235	236	231,3	230
2	242	228	229	233,0	219	221	223	221,0	232	216	228	225,3	226
3	219	231	227	225,7	226	228	230	228,0	226	223	228	225,7	226
4	229	216	217	220,7	224	220	221	221,7	233	224	227	228,0	223
5	221	216	223	220,0	220	219	213	217,3	215	222	230	222,3	220
6	218	221	229	222,7	215	218	218	217,0	226	217	225	222,7	221
7	216	222	224	220,7	216	220	210	215,3	219	232	228	226,3	221
8	217	219	228	221,3	217	220	215	217,3	222	224	226	224,0	221
9	211	206	226	214,3	220	227	217	221,3	220	217	234	223,7	220
10	217	213	225	218,3	218	209	213	213,3	227	226	221	224,7	219
11	215	214	220	216,3	216	218	208	214,0	230	233	252	238,3	223
12	211	227	234	224,0	223	219	213	218,3	216	223	222	220,3	221
13	171	173	175	173,0	177	186	174	179,0	190	436	236	287,3	213
14	163	167	179	169,7	170	171	175	172,0	180	173	184	179,0	174
15	162	168	162	164,0	169	167	165	167,0	169	165	175	169,7	167
16	153	158	161	157,3	164	161	161	162,0	170	168	171	169,7	163
17	157	158	156	157,0	155	160	158	157,7	159	162	158	159,7	158
18	160	157	159	158,7	159	165	158	160,7	154	154	158	155,3	158

Tabela 7.9 - Microdureza Vickers ($HV_{0,5}$) em cada uma das secções avaliadas em função da posição (linhas) dentro dos depósitos obtidos com corrente constante e alimentação pulsada (velocidade de alimentação = 1,7 m/min) (teste 2A)

Amostra 2A = corrente constante e alimentação pulsada (velocidade de alimentação = 1,7 m/min)													
Ponto ↓ (região fundida para substrato)	Secção transversal												Média geral (HV) ↓
	1				2				3				
	Linha 1 (HV)	Linha 2 (HV)	Linha 3 (HV)	Média (HV)	Linha 1 (HV)	Linha 2 (HV)	Linha 3 (HV)	Média (HV)	Linha 1 (HV)	Linha 2 (HV)	Linha 3 (HV)	Média (HV)	
1	222	233	239	231,3	217	224	233	224,7	232	222	230	228,0	228
2	248	222	222	230,7	219	224	210	217,7	232	234	230	232,0	224
3	212	223	234	223,0	223	217	226	222,0	229	233	224	228,7	223
4	215	229	227	223,7	223	230	218	223,7	228	218	214	220,0	224
5	217	229	232	226,0	222	209	224	218,3	225	219	228	224,0	222
6	225	218	227	223,3	211	221	224	218,7	215	224	231	223,3	221
7	225	224	222	223,7	228	221	219	222,7	220	224	226	223,3	223
8	270	235	242	249,0	228	221	223	224,0	220	221	233	224,7	237
9	239	222	227	229,3	222	226	230	226,0	223	218	226	222,3	228
10	234	221	227	227,3	224	222	224	223,3	222	217	221	220,0	225
11	216	238	226	226,7	220	234	224	226,0	230	220	220	223,3	226
12	228	311	181	240,0	235	227	254	238,7	236	221	228	228,3	239
13	184	195	172	183,7	171	179	170	173,3	234	229	220	227,7	179
14	178	173	169	173,3	170	166	175	170,3	204	177	192	191,0	172
15	169	168	171	169,3	162	166	167	165,0	176	176	180	177,3	167
16	163	158	159	160,0	156	164	159	159,7	178	174	168	173,3	160
17	165	170	166	167,0	156	162	157	158,3	165	170	169	168,0	163
18	166	164	166	165,3	160	163	158	160,3	169	167	168	168,0	163

Tabela 7.10 - Microdureza Vickers ($HV_{0,5}$) em cada uma das secções avaliadas em função da posição (linhas) dentro dos depósitos obtidos com corrente constante e alimentação pulsada (velocidade de alimentação = 1,7 m/min) (teste 2B – réplica)

Amostra 2B = corrente constante e alimentação pulsada (velocidade de alimentação = 1,7 m/min) (réplica)													
Ponto ↓ (região fundida para substrato)	Secção transversal												Média geral (HV) ↓
	1				2				3				
	Linha 1 (HV)	Linha 2 (HV)	Linha 3 (HV)	Média (HV)	Linha 1 (HV)	Linha 2 (HV)	Linha 3 (HV)	Média (HV)	Linha 1 (HV)	Linha 2 (HV)	Linha 3 (HV)	Média (HV)	
1	219	208	216	214,3	211	227	226	221,3	216	228	215	219,7	218
2	220	227	213	220,0	234	224	226	228,0	216	227	226	223,0	224
3	218	221	222	220,3	213	216	217	215,3	203	219	224	215,3	217
4	215	210	223	216,0	216	222	228	222,0	227	218	224	223,0	220
5	221	214	220	218,3	214	214	224	217,3	215	219	241	225,0	220
6	207	221	211	213,0	224	229	217	223,3	228	225	212	221,7	219
7	212	210	210	210,7	210	214	216	213,3	220	216	228	221,3	215
8	219	214	214	215,7	218	219	219	218,7	213	220	221	218,0	217
9	218	219	212	216,3	210	197	224	210,3	214	211	219	214,7	214
10	213	216	228	219,0	213	223	208	214,7	213	211	213	212,3	215
11	215	208	208	210,3	216	218	238	224,0	222	216	220	219,3	218
12	204	216	222	214,0	221	227	222	223,3	226	215	223	221,3	220
13	224	210	240	224,7	215	207	214	212,0	205	229	207	213,7	217
14	409	378	178	321,7	219	304	181	234,7	159	192	168	173,0	243
15	163	176	157	165,3	173	189	172	178,0	161	166	166	164,3	169
16	157	156	164	159,0	170	181	173	174,7	169	161	164	164,7	166
17	153	154	163	156,7	163	178	179	173,3	167	185	186	179,3	170
18	156	153	160	156,3	167	172	168	169,0	159	155	160	158,0	161

Como pode se observar pelas Tabelas 7.7 e 7.8, os depósitos produzidos com corrente pulsada sincronizada com alimentação pulsada (1A/1B) tenderam a um patamar médio de 224,9 HV (teste 1A) e 221,9 HV (teste 1B), com pequena variação ao longo da profundidade do cordão e boa repetibilidade considerando a réplica. De acordo com as Tabelas 7.9 e 7.10, os depósitos produzidos com corrente constante e alimentação pulsada (2A/2B) apresentaram dureza média de 226,7 HV (amostra 2A) e 219,9 HV (amostra 2B), com comportamento igualmente uniforme. Em ambas as condições, registrou-se transição clara para valores mais baixos de dureza na ZAC e no metal de base (cerca de 163-167 HV), algo esperado para um aço carbono comum submetido ao ciclo térmico de soldagem.

Em alguns pontos próximos à linha de fusão, observaram-se picos localizados de dureza, os quais podem estar associados à formação localizada de carbonetos de Cr em decorrência da maior incorporação de carbono proveniente do metal de base. As Figuras 7.20 e 7.21 apresentam os perfis médios de dureza obtidos para cada uma das seções avaliadas dos depósitos produzidos, correspondentes às amostras 1A/1B e 2A/2B, respectivamente.

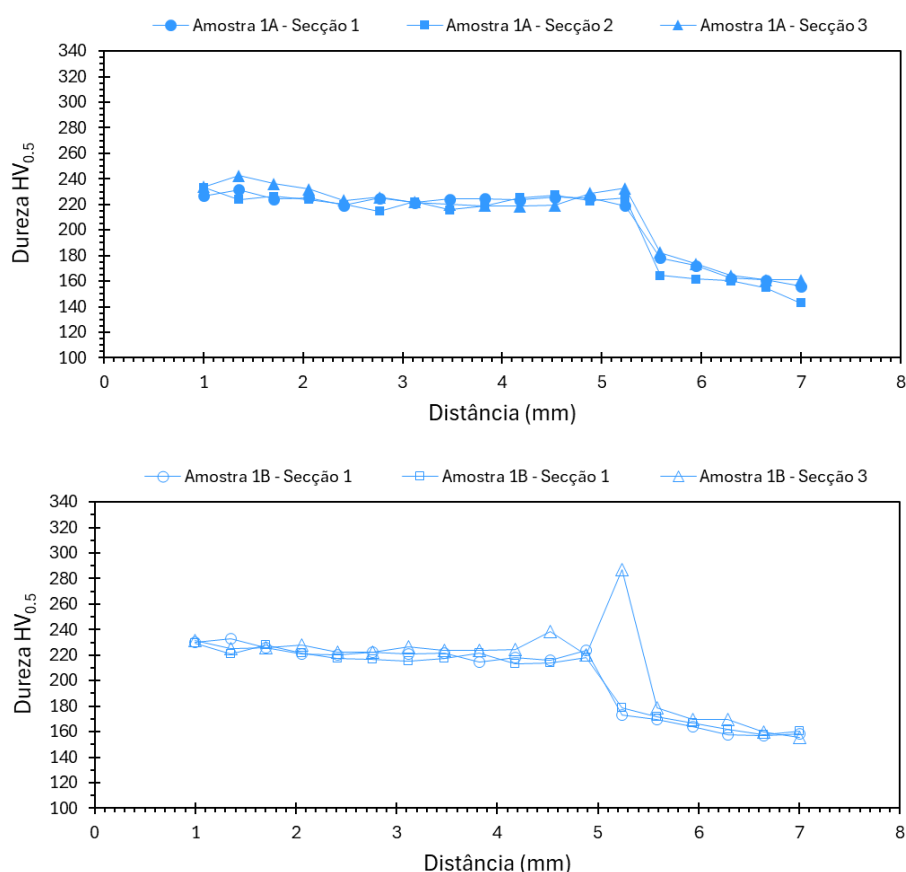


Figura 7.20 - Perfis de dureza médios em cada uma das seções avaliadas dos depósitos produzidos com corrente pulsada sincronizada com alimentação pulsada (velocidade de alimentação = 2,2 m/min) em função da distância do topo dos depósitos: (superior) teste 1A; (inferior) teste 1B (réplica)

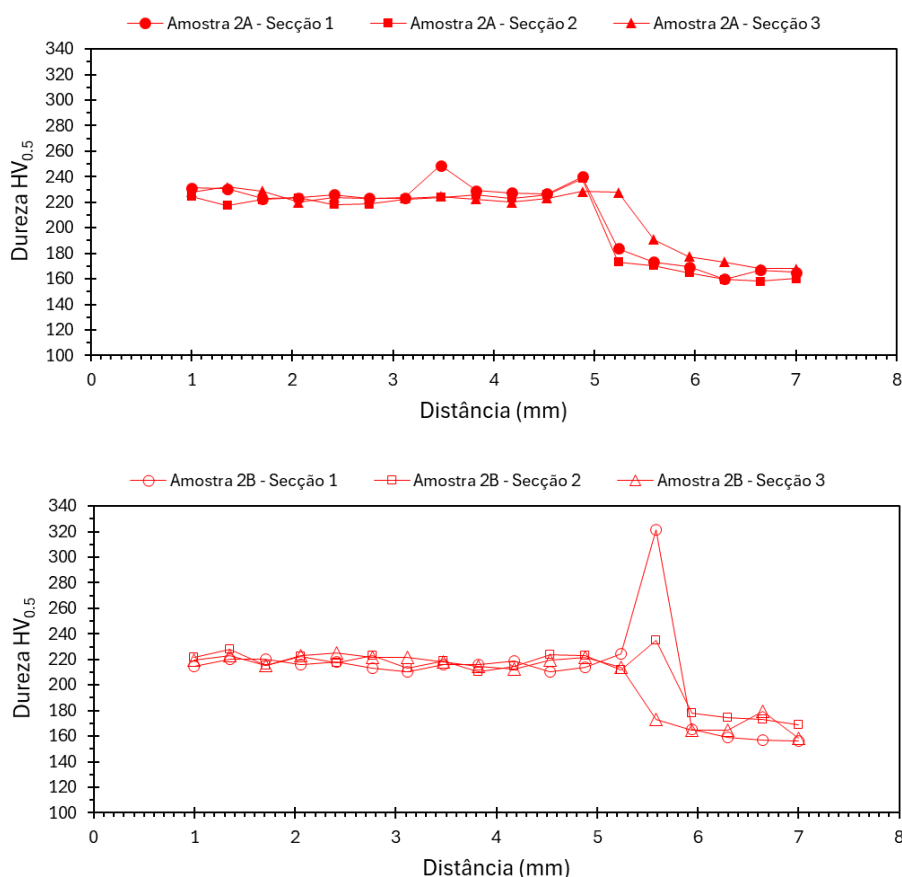


Figura 7.21 - Perfis de dureza médios em cada uma das seções avaliadas dos depósitos produzidos com corrente constante e alimentação pulsada (velocidade de alimentação = 1,7 m/min) em função da distância do topo dos depósitos: (superior) teste 2A; (inferior) teste 2B (réplica)

Para facilitar a comparação, na Figura 7.22 são apresentados os perfis médios de dureza obtidos para as condições de corrente pulsada sincronizada com alimentação pulsada e de corrente constante com alimentação pulsada. Observa-se, em ambos os casos, um patamar de dureza relativamente uniforme, evidenciando a homogeneidade das propriedades mecânicas do depósito. Além disso, a reduzida dispersão entre as seções avaliadas demonstra a boa repetibilidade dos resultados, indicando elevada estabilidade do processo de deposição.

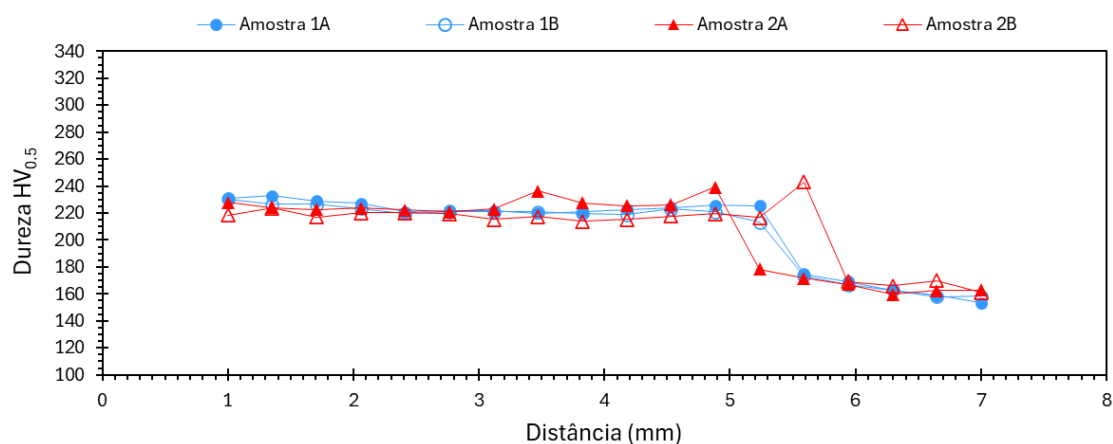


Figura 7.22 - Perfis médios de microdureza ($HV_{0.5}$) em função da distância do topo do depósito para os testes 1A/1B e 2A/2B

A uniformidade dos valores de dureza verificada em ambas as condições de deposição pode ser atribuída à agitação da poça de fusão decorrente da pulsação da corrente e, sobretudo, da entrada e saída cíclica e frequente do arame até regiões próximas ao fundo da poça, comportamento característico da operação em velocidade de alimentação limite. Essa agitação intensa e de maior profundidade, mantida até os instantes que antecedem a solidificação, pode favorecer a homogeneização dos elementos em solução, contribuindo para uma distribuição mais uniforme das fases e, conseqüentemente, para a maior regularidade das propriedades mecânicas dentro do depósito.

Em termos de dureza resultante, observa-se equivalência entre as condições avaliadas, a despeito da diferença no mecanismo de operação: a condição de corrente pulsada sincronizada com alimentação pulsada operou a uma velocidade de alimentação aproximadamente 30% superior à da condição de corrente constante com alimentação pulsada, mantendo, contudo, propriedades mecânicas equivalentes.

Conclui-se, portanto, que, para os materiais e condições empregados, a técnica de sincronismo entre a pulsação da alimentação de arame e da corrente permitiu elevar a produtividade em termos de capacidade de deposição por meio do incremento da velocidade de alimentação, mas sem comprometer as propriedades mecânicas do depósito produzido.

7.3.4 Diluição química

As Tabelas de 7.11 a 7.14 apresentam a composição química, em porcentagem de massa, dos principais elementos de liga (Cr e Ni) vindos do metal de adição utilizado como presentes nos depósitos obtidos nas duas principais condições de deposição avaliadas.

Tabela 7.11 - Composição química (% em massa) de Cr e Ni em função da posição no depósito – teste 1A (corrente pulsada sincronizada com alimentação pulsada a 2,2 m/min).

Amostra 1A = corrente pulsada sincronizada com alimentação pulsada (velocidade de alimentação = 2,2 m/min)								
Ponto ↓ (região fundida para s	Secção transversal						Cr médio geral (%) ↓	Ni médio geral (%) ↓
	1		2		3			
	Cr (%)	Ni (%)	Cr (%)	Ni (%)	Cr (%)	Ni (%)		
7	21,82	8,37	20,41	8,09	20,64	7,43	20,96	7,96
6	20,76	8,80	20,71	7,45	20,77	7,79	20,75	8,01
5	21,56	7,74	21,04	8,22	20,57	7,53	21,06	7,83
4	22,03	6,84	24,39	6,36	20,74	8,27	22,39	7,16
3	21,63	6,74	20,24	8,15	19,94	8,71	20,60	7,87
2	22,56	7,20	20,46	8,12	18,78	7,22	20,60	7,51
1	20,26	4,31	19,95	8,09	22,57	8,72	20,93	7,04
0 (linha de fusão)	2,47	1,04	0,43	0,18	0,76	0,51	1,22	0,58

Tabela 7.12 - Composição química (% em massa) de Cr e Ni em função da posição no depósito – teste 1B – réplica (corrente pulsada sincronizada com alimentação pulsada a 2,2 m/min).

Amostra 1B = corrente pulsada sincronizada com alimentação pulsada (velocidade de alimentação = 2,2 m/min) (réplica)								
Ponto ↓ (região fundida substrato)	Secção transversal						Cr médio geral (%) ↓	Ni médio geral (%) ↓
	1		2		3			
	Cr (%)	Ni (%)	Cr (%)	Ni (%)	Cr (%)	Ni (%)		
7	18,87	7,42	18,58	6,68	21,22	8,39	19,56	7,50
6	19,46	6,81	18,16	6,64	21,24	7,98	19,62	7,14
5	18,59	7,31	18,00	6,70	21,11	8,16	19,23	7,39
4	19,13	7,86	18,29	7,15	20,60	7,76	19,34	7,59
3	18,30	7,52	18,88	7,54	20,81	7,79	19,33	7,62
2	18,75	7,20	18,82	7,54	22,14	6,90	19,90	7,21
1	18,89	7,05	17,61	7,38	20,29	7,78	18,93	7,40
0 (linha de fusão)	0,45	0,10	0,50	0,20	1,66	0,92	0,87	0,41

Tabela 7.13 - Composição química (% em massa) de Cr e Ni em função da posição no depósito – teste 2A (corrente constante com alimentação pulsada a 1,7 m/min).

Amostra 2A = corrente constante e alimentação pulsada (velocidade de alimentação = 1,7 m/min)								
Ponto ↓ (região fundida substrato)	Secção transversal						Cr médio geral (%) ↓	Ni médio geral (%) ↓
	1		2		3			
	Cr (%)	Ni (%)	Cr (%)	Ni (%)	Cr (%)	Ni (%)		
7	18,08	6,98	18,31	6,93	19,77	7,28	18,72	7,06
6	17,58	6,35	17,77	6,11	19,80	7,73	18,38	6,73
5	18,52	6,45	18,54	6,93	20,73	7,46	19,26	6,95
4	17,15	6,27	18,71	7,18	20,45	8,46	18,77	7,30
3	16,48	5,67	18,68	6,54	21,28	7,81	18,81	6,67
2	15,96	5,55	18,45	6,38	20,27	8,02	18,23	6,65
1	17,48	6,25	19,55	5,65	20,39	7,47	19,14	6,46
0 (linha de fusão)	0,60	0,55	0,34	0,00	1,20	0,75	0,71	0,43

Tabela 7.14 - Composição química (% em massa) de Cr e Ni em função da posição no depósito – teste 2B – réplica (corrente constante com alimentação pulsada a 1,7 m/min).

BAmostra 2B = corrente constante e alimentação pulsada (velocidade de alimentação = 1,7 m/min) (réplica)								
Ponto ↓ (região fundida para substrato)	Secção transversal						Cr médio geral (%) ↓	Ni médio geral (%) ↓
	1		2		3			
	Cr (%)	Ni (%)	Cr (%)	Ni (%)	Cr (%)	Ni (%)		
7	15,63	5,43	17,64	7,10	17,49	6,32	16,92	6,28
6	14,42	5,10	16,92	6,35	18,23	6,79	16,52	6,08
5	14,36	5,40	17,85	6,37	18,71	6,89	16,97	6,22
4	14,98	6,02	17,16	6,96	17,53	7,04	16,56	6,67
3	11,70	4,81	18,56	7,69	18,63	5,48	16,30	5,99
2	16,01	4,93	17,82	5,80	17,64	5,66	17,16	5,46
1	15,32	5,57	17,69	6,68	17,69	6,64	16,90	6,30
0 (linha de fusão)	1,24	0,45	0,60	0,25	0,71	0,52	0,85	0,41

A Figura 7.23 apresenta os perfis de composição química de Cr e Ni obtidos nas três seções transversais avaliadas dos depósitos produzidos pelos testes 1A/1B (corrente pulsada sincronizada com alimentação pulsada, velocidade de alimentação = 2,2 m/min), em função da distância à interface depósito/substrato (linha de fusão). As linhas tracejadas de referência correspondem aos teores nominais do arame de adição (25,7% Cr e 9,8% Ni), permitindo avaliar o grau de diluição com o metal de base dentro do depósito.

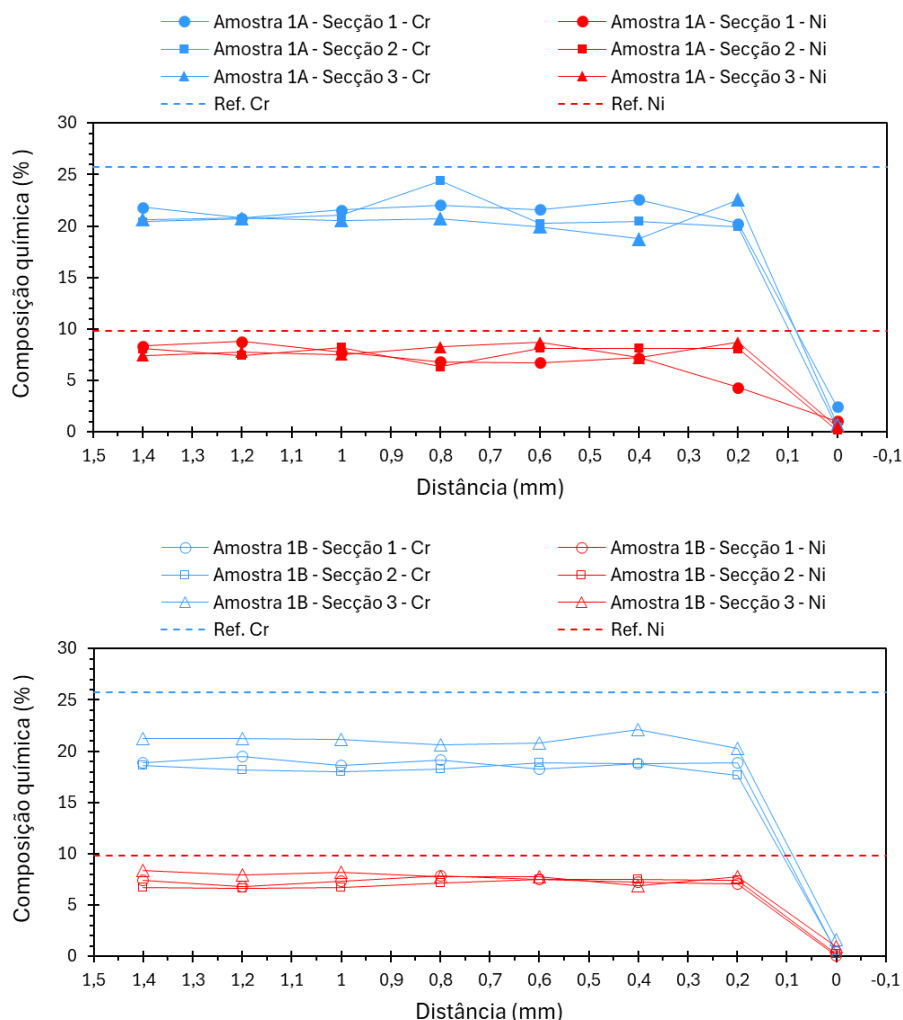


Figura 7.23 - Perfis de composição química de Cr e Ni (% em massa) nas seções transversais dos depósitos produzidos com corrente pulsada sincronizada com alimentação pulsada (2,2 m/min), em função da distância à interface depósito/substrato. As linhas tracejadas indicam os teores nominais do arame de adição. (superior) teste 1A; (inferior) teste 1B (réplica).

Como pode ser observado na Figura 7.23, os perfis das três seções no caso do teste 1A apresentam boa repetibilidade entre si, com patamares de composição relativamente estáveis ao longo da distância avaliada, situando-se em torno de 21,0% de Cr e 7,6% de Ni, valores inferiores aos do arame, evidenciando diluição com o metal de base, porém com menor redução comparativamente à condição não sincronizada. A réplica da condição sincronizada, teste 1B, exibe comportamento análogo, com patamares médios de 19,4% de Cr e 7,4% de Ni, confirmando a repetibilidade do processo. Em ambos os depósitos, os teores de Cr e Ni decrescem abruptamente na linha de fusão, atingindo valores próximos de zero, consistentemente com a composição do metal de base.

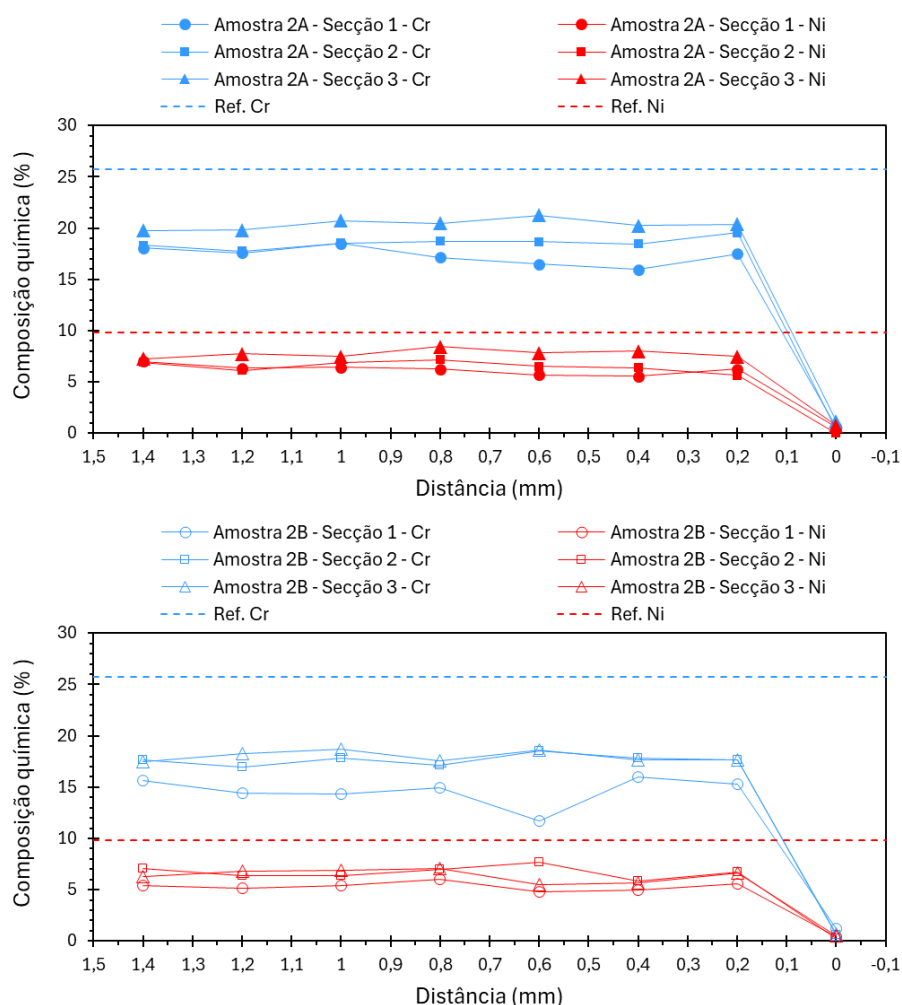


Figura 7.24 - Perfis de composição química de Cr e Ni (% em massa) nas seções transversais dos depósitos produzidos com corrente constante e alimentação pulsada (1,7 m/min), em função da distância à interface depósito/substrato. As linhas tracejadas indicam os teores nominais do arame de adição. (superior) teste 2A; (inferior) teste 2B (réplica).

Os perfis da amostra 2A (Figura 7.24) também apresentam boa repetibilidade entre as três seções avaliadas, com patamares situados em torno de 18,8% de Cr e 6,8% de Ni. Em comparação aos teores do arame de adição, esses valores refletem maior diluição com o metal de base do que a verificada na condição sincronizada, evidenciando que a ausência de sincronismo resulta em menor preservação dos elementos de liga no depósito. A réplica desta condição, teste 2B, apresenta patamares médios de 16,8% de Cr e 6,1% de Ni, confirmando a tendência observada, embora com teores ligeiramente inferiores aos da amostra 2A, o que pode ser atribuído à variabilidade inerente ao processo de deposição. Em ambos os depósitos, os teores de Cr e Ni reduzem-se a valores próximos de zero na linha de fusão, novamente pela composição do metal de base.

Para comparação, na Figura 7.25 são compilados os perfis médios de composição química para as condições avaliadas. Os resultados evidenciam a constância do patamar composicional ao longo dos depósitos em termos dos elementos principais (Cr e Ni) e, comparativamente, a menor diluição com o metal de base, ou seja, maior preservação dos elementos de liga em relação à composição do arame de adição, na condição de corrente pulsada sincronizada com alimentação pulsada frente à condição de corrente constante com alimentação pulsada.

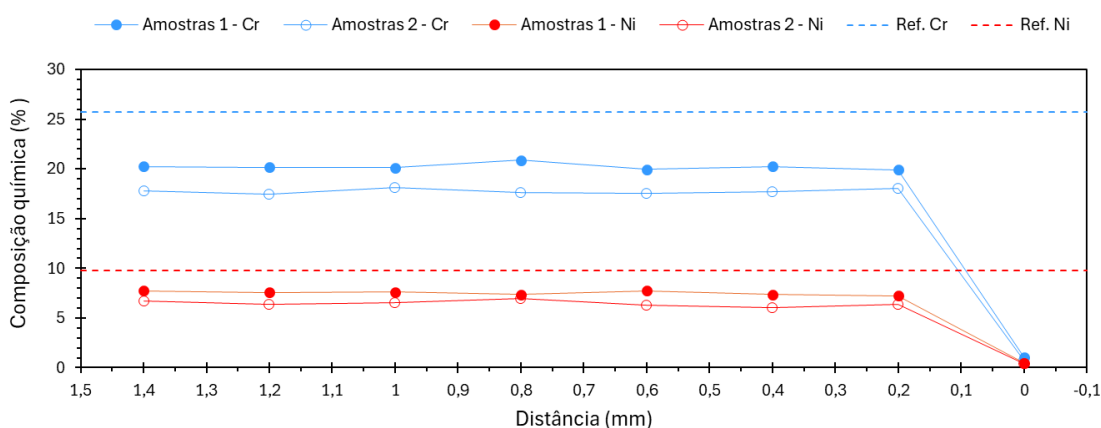


Figura 7.25 - Perfis médios de composição química (% Cr e % Ni em massa, por EDS) em função da distância à interface depósito/substrato. As linhas horizontais tracejadas indicam os teores de referência no arame ER2594.

Em síntese, os depósitos das amostras 1A e 1B apresentaram respectivamente teores médios de Cr de 21,0% e 19,4% e de Ni de 7,6% e 7,4% (Tabela 7.15). Comparativamente, os depósitos das amostras 2A e 2B registraram respectivamente teores de Cr de 18,8% e 16,8% e de Ni de 6,8% e 6,1%. Tendo como referência a composição nominal do arame de adição (25,7% Cr e 9,8% Ni), os casos com sincronização (1A/1B) preservaram, em média, aproximadamente 2,4% a mais de Cr e 1,0% a mais de Ni em relação aos casos com corrente constante e alimentação pulsada (2A/2B), evidenciando menor diluição (perda) dos elementos nobres com o metal de base com a adoção da técnica sincronizada.

Tabela 7.15 - Teores médios de Cr e Ni (% em massa) nos depósitos das principais condições analisadas comparadas à composição de referência do arame ER2594.

Teste	Cr médio (%)	Ni médio (%)	Cr ref. arame (%)	Ni ref. arame (%)
1A	21,0	7,6	25,7	9,8
1B	19,4	7,4	25,7	9,8
2A	18,8	6,8	25,7	9,8
2B	16,8	6,1	25,7	9,8

A diferença composicional observada justifica-se diretamente pela maior velocidade de alimentação permitida pelo sincronismo: com maior massa de arame incorporada ao cordão por unidade de comprimento para a mesma energia de soldagem, a fração do depósito oriunda do metal de base é proporcionalmente menor, resultando em teores mais elevados de Cr e Ni. A uniformidade das distribuições desses elementos ao longo do perfil, verificada em ambas as condições de deposição, pode ser atribuída à agitação da poça promovida pela pulsação do arame, que tende a favorecer a homogeneização dos elementos de liga, característica particularmente relevante em revestimentos de camada única, onde a constância composicional ao longo da espessura

condiciona a regularidade da resistência à corrosão, por exemplo. Assim, do ponto de vista aplicado, a maior presença de Cr e Ni nos depósitos da condição sincronizada representa um ganho qualitativo direto em aplicações de revestimento protetivo, dado o papel central desses elementos nas propriedades de resistência à corrosão do aço inoxidável super duplex.

Conclui-se, portanto, que, para os materiais e parâmetros utilizados, a técnica de pulsação de alimentação de arame sincronizada com a corrente pulsada oferece simultaneamente maior produtividade (capacidade de deposição aproximadamente 30% superior) e melhores propriedades químicas (representadas pela maior presença de Cr e Ni) do depósito formado.

7.3.5 Balanço de fases (ferrita/austenita)

O balanço de fases resultante das duas condições de deposição principais é apresentado em termos do percentual de ferrita, sendo o percentual de austenita o valor complementar. As Tabelas da 7.15 à 7.18 listam os teores de ferrita obtidos nas deposições com corrente pulsada sincronizada com alimentação pulsada (testes 1A/1B) e com corrente constante e alimentação pulsada (testes 2A/2B), determinados por análise de imagem das micrografias selecionadas em cada nível e seção avaliados.

Tabela 7.15 - Percentual de ferrita em cada uma das secções avaliadas em função da posição dentro dos depósitos (topo, meio e fundo) obtidos com corrente pulsada sincronizada com alimentação pulsada a 2,2 m/min (teste 1A) (DP = desvio padrão)

Amostra 1A = corrente pulsada sincronizada com alimentação pulsada (velocidade de alimentação = 2,2 m/min)																					
Nível (local) ↓ (região fundida)	Secção transversal																				
	1							2							3						
	Imagem (região)					Média	DP	Imagem (região)					Média	DP	Imagem (região)					Média	DP
	1	2	3	4	5	Média	DP	6	7	8	9	10	Média	DP	11	12	13	14	15	Média	DP
Topo	29,7	30,0	32,7	32,1	30,7	31,0	1,3	31,0	33,8	32,7	30,0	23,3	30,2	4,1	34,8	26,2	22,7	22,3	21,4	25,5	5,5
Meio	29,4	29,0	26,6	29,9	24,1	27,8	2,4	24,8	25,5	26,7	29,9	35,9	28,6	4,5	27,6	25,2	14,5	23,2	24,6	23,0	5,0
Fundo	20,1	23,0	26,0	25,6	26,1	24,2	2,6	24,9	27,7	22,5	19,0	23,3	23,5	3,2	26,0	26,3	29,2	26,0	27,4	27,0	1,4

Tabela 7.16 - Percentual de ferrita em cada uma das secções avaliadas em função da posição dentro dos depósitos (topo, meio e fundo) obtidos com corrente pulsada sincronizada com alimentação pulsada a 2,2 m/min (teste 1B) (DP = desvio padrão)

Amostra 1B = corrente pulsada sincronizada com alimentação pulsada (velocidade de alimentação = 2,2 m/min) (réplica)																					
Nível (local) ↓ (região fundida)	Secção transversal																				
	1							2							3						
	Imagem (região)					Média	DP	Imagem (região)					Média	DP	Imagem (região)					Média	DP
	1	2	3	4	5	Média	DP	6	7	8	9	10	Média	DP	11	12	13	14	15	Média	DP
Topo	13,7	12,2	17,5	17,1	10,6	14,2	3,0	16,8	22,7	20,0	19,6	16,2	19,1	2,6	13,1	16,9	18,9	22,1	22,3	18,7	3,8
Meio	15,2	14,9	17,9	15,9	19,9	16,8	2,1	18,9	17,4	18,3	16,5	19,6	18,1	1,2	24,0	24,5	22,8	17,6	23,5	22,5	2,8
Fundo	20,2	23,9	18,4	18,2	18,8	19,9	2,4	16,0	16,5	12,1	14,2	11,7	14,1	2,2	22,3	20,1	17,8	17,4	17,6	19,0	2,1

Tabela 7.17 - Percentual de ferrita em cada uma das secções avaliadas em função da posição dentro dos depósitos (topo, meio e fundo) obtidos com corrente constante e alimentação pulsada a 1,7 m/min (teste 2A) (DP = desvio padrão)

Amostra 2A = corrente constante e alimentação pulsada (velocidade de alimentação = 1,7 m/min)																					
Nível (local) ↓ (região fundida)	Secção transversal																				
	1							2							3						
	Imagem (região)					Média	DP	Imagem (região)					Média	DP	Imagem (região)					Média	DP
	1	2	3	4	5	Média	DP	6	7	8	9	10	Média	DP	11	12	13	14	15	Média	DP
Topo	17,0	23,1	22,5	23,2	21,9	21,5	2,6	22,1	25,0	22,5	23,0	23,0	23,1	1,1	20,7	22,8	20,0	18,5	20,1	20,4	1,6
Meio	21,9	23,2	20,8	21,6	19,5	21,4	1,4	20,7	20,9	22,8	19,8	20,9	21,0	1,1	21,6	20,6	18,8	19,2	22,2	20,5	1,5
Fundo	15,4	23,5	24,5	24,8	24,8	22,6	4,1	21,3	18,5	20,4	22,8	23,7	21,3	2,0	23,5	19,3	23,2	22,6	24,0	22,5	1,9

Tabela 7.18 - Percentual de ferrita em cada uma das secções avaliadas em função da posição dentro dos depósitos (topo, meio e fundo) obtidos com corrente constante e alimentação pulsada a 1,7 m/min (teste 2B) (DP = desvio padrão)

Amostra 2B = corrente constante e alimentação pulsada (velocidade de alimentação = 1,7 m/min) (réplica)																					
Nível (local) ↓ (região fundida)	Secção transversal																				
	1							2							3						
	Imagem (região)					Média	DP	Imagem (região)					Média	DP	Imagem (região)					Média	DP
	1	2	3	4	5	Média	DP	6	7	8	9	10	Média	DP	11	12	13	14	15	Média	DP
Topo	22,6	21,5	21,5	19,3	22,5	21,5	1,3	19,5	21,1	18,4	20,6	18,8	19,7	1,2	20,0	18,7	21,1	20,0	20,9	20,1	1,0
Meio	23,2	20,0	21,4	22,5	22,1	21,8	1,2	18,5	18,2	19,4	18,8	17,8	18,5	0,6	19,5	20,4	17,9	19,2	18,8	19,2	0,9
Fundo	23,3	22,4	17,4	18,2	20,5	20,4	2,6	20,4	18,7	16,7	17,2	19,5	18,5	1,5	19,4	17,4	22,2	19,7	21,7	20,1	1,9

Como compilado na Figura 7.26, o percentual de ferrita nas seções avaliadas dos depósitos produzidos nas condições sincronizadas (testes 1A/1B) exibiu variação considerável, tanto ao longo de um mesmo depósito quanto entre os testes. Esse comportamento contrasta com a relativa uniformidade verificada para a composição química (Cr e Ni) nesses mesmos depósitos, o que sugere que os mecanismos dominantes para cada fator podem ser distintos. Enquanto a composição química parece ter sido governada primariamente pela mistura mecânica promovida pela pulsação conjunta do arame e da corrente (com efeito favorável), o balanço de fases pode ter sido influenciado de forma mais pronunciada pelo histórico térmico local imposto pelo ciclo de pulsação. A entrada do arame na poça com corrente elevada e sua retirada com corrente reduzida configura uma sequência de aquecimento e resfriamento localizado e recorrente que, dependendo de sua frequência e magnitude, poderia definir as fases formadas durante a solidificação e o resfriamento subsequente, resultando em distribuições de fases heterogêneas tanto na seção transversal quanto ao longo do comprimento dos depósitos. Assim, uma forma de elucidar melhor essa questão seria fazer uma avaliação com diferentes níveis e frequências de corrente de soldagem e pulsação da alimentação do arame e escrutinar os depósitos produzidos em termos de balanço de fases também em seções longitudinais para verificar se variações nessa direção se confirmam e em quais faixas dos parâmetros de pulsação.

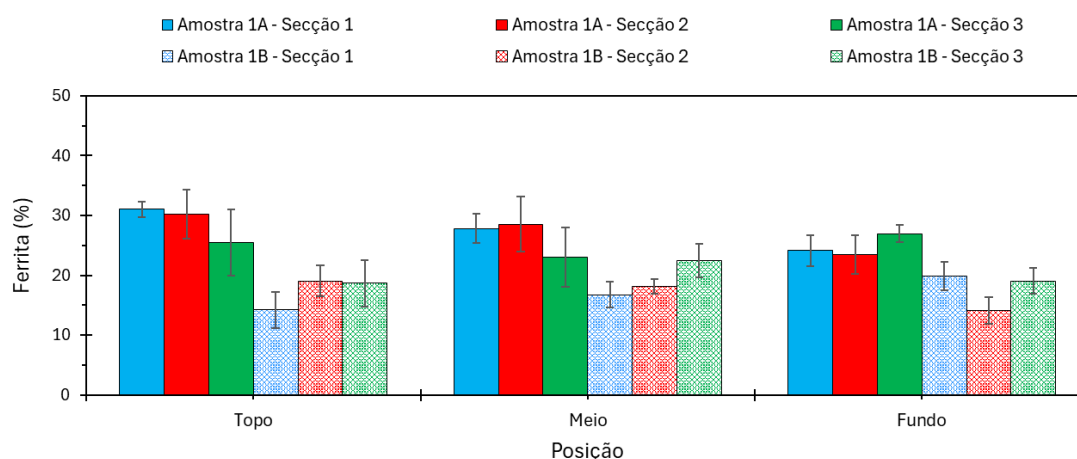


Figura 7.26 - Percentual de ferrita nas seções transversais avaliadas em função da posição no depósito (topo, meio e fundo), produzido com corrente pulsada sincronizada com alimentação pulsada a 2,2 m/min: testes 1A/1B

Como resumido na Figura 7.27, o percentual de ferrita nas seções avaliadas dos depósitos produzidos nas condições sem sincronismo (testes 2A/2B) apresentou distribuição mais uniforme, tanto ao longo de cada depósito quanto entre as amostras. Esse resultado corrobora a hipótese levantada anteriormente: a maior heterogeneidade no balanço de fases observada na condição sincronizada estaria associada ao efeito térmico cíclico imposto pela pulsação sincronizada da corrente e do arame, o qual está ausente ou menos presente na condição de corrente constante com alimentação pulsada. A uniformidade verificada no caso dos testes 2A/2B reforça, por contraste, que a pulsação da corrente (e não apenas a pulsação do arame) é o fator determinante para a variação do balanço ferrita/austenita. Nesse sentido, como complemento a futuras

investigações sugeridas anteriormente, seria relevante avaliar o efeito isolado da pulsação do arame (sem pulsação de corrente) e de seus parâmetros (frequência e amplitude) sobre o balanço de fases formado, de modo a desacoplar as contribuições térmicas e mecânicas de cada componente do processo.

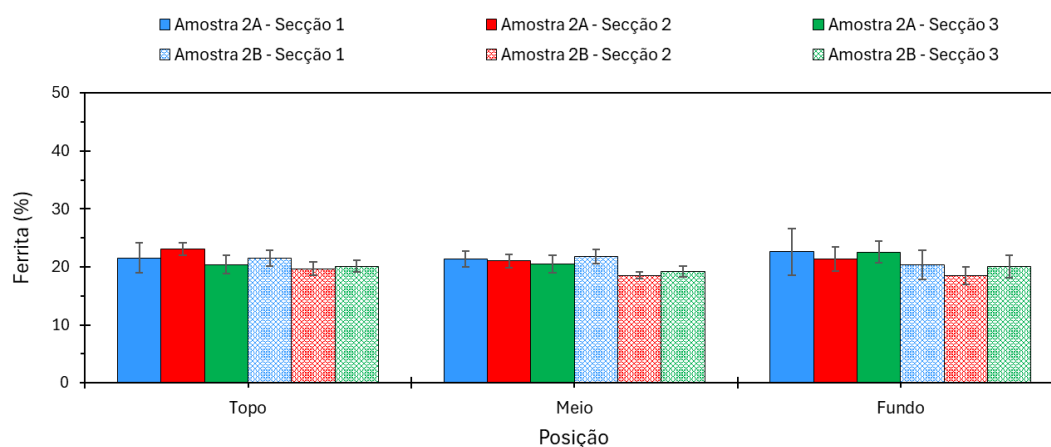


Figura 7.27 - Percentual de ferrita nas seções transversais avaliadas em função da posição no depósito (topo, meio e fundo), produzido com corrente constante e alimentação contínua a 1,7 m/min: testes 2A/2B

A Figura 7.28 compara diretamente, em termos de médias gerais, os resultados de balanço de fases obtidos com as duas condições de deposição principais. Como se pode observar, ambas as condições resultaram em patamares de ferrita bastante próximos entre si (aproximadamente 22,4% para a condição sincronizada e 20,8% para a condição com corrente constante), com o complemento correspondendo ao percentual de austenita. Esses valores situam-se significativamente abaixo da faixa de 30-70% aceita por normas mais tolerantes (NORSOK M-601, 2016) e distantes do balanço nominal com 50% de ferrita e 50% de austenita geralmente preconizado para o desempenho otimizado de aços inoxidáveis super duplex em termos mecânicos (resistência, dureza e tenacidade) e de resistência à corrosão.

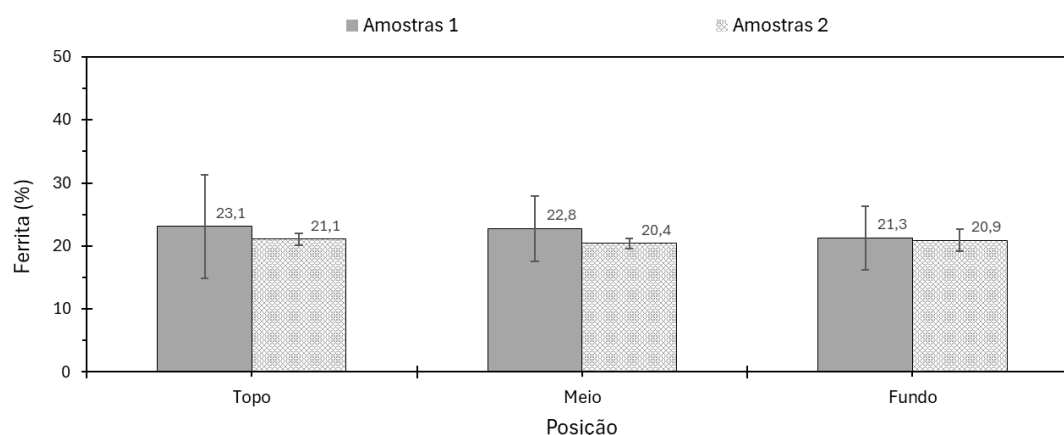


Figura 7.28 - Teor médio de ferrita (% em área) em função da posição no depósito (topo, meio e fundo), obtido para as duas condições de deposição principais: testes 1 (corrente pulsada sincronizada com alimentação pulsada a 2,2 m/min) e testes 2 (corrente constante e alimentação pulsada a 1,7 m/min)

A equivalência no balanço de fases entre as duas condições (~21% de ferrita em ambos os casos) é consistente com a semelhança nos valores de dureza verificados (~220 HV) e está em linha com o reportado por Ranjbar et al. (2025), que destacam que a dureza de depósitos de aço inoxidável duplex pode ser correlacionada com a proporção ferrita/austenita. A título de referência, os mesmos autores, ao trabalharem com arame ER2594 depositado por processo TIG pulsado (corrente média ~116 A, aporte térmico ~1,24 kJ/mm) em revestimentos de três camadas com alimentação contínua, obtiveram ~310 HV com 38,3% de ferrita. Esse resultado da literatura com balanço de fases dentro da faixa normativa e dureza superior ao verificado no presente trabalho pode ser justificado pelo maior percentual de ferrita (mais dura que a austenita) do que fora encontrado nessa tese, embora obtido em condições distintas (múltiplas camadas, parâmetros e processo diferenciados).

Cabe ressaltar que os resultados aqui apresentados foram alcançados com a condição sincronizada operando a uma velocidade de alimentação aproximadamente 30% superior à da condição com corrente constante e alimentação pulsada, mas com manutenção de propriedades equivalentes em termos de dureza e balanço de fases. Isso representa um ganho de produtividade expressivo para um resultado metalúrgico equivalente. Para evoluir nos resultados (em particular no sentido de aproximar o balanço de fases da faixa normativa), será necessário, em trabalhos futuros, otimizar os parâmetros de pulsação da alimentação do arame e da corrente de soldagem, possivelmente pela combinação de simulações numéricas e experimentos direcionados, de modo a equilibrar os efeitos sobre composição química, balanço de fases e propriedades mecânicas e adequar a técnica desenvolvida a aplicações práticas e industriais.

Por fim, como também ilustra a Figura 7.29, não foi observada presença relevante de poros nas seções transversais avaliadas para nenhuma das duas condições de deposição principais. Esse resultado merece destaque pois, a priori, a intensa agitação da poça de fusão imposta pela entrada e saída rápida da ponta do arame (especialmente na condição sincronizada), em que altas velocidades de alimentação reduzem o intervalo disponível para o escape de gases possivelmente aprisionados, poderia favorecer a retenção de bolhas de gás e assim a formação de porosidade. O fato de tal fenômeno não ter sido observado sugere que, nas condições avaliadas, a agitação (até mais mecânica do que térmica) da poça promove degaseificação suficiente antes da sua solidificação, independentemente de a corrente ser constante ou pulsada de forma sincronizada. Para trabalhos futuros, recomenda-se investigar a influência de diferentes frequências e amplitudes de pulsação do arame e da corrente sobre a formação de porosidade, verificando se esse resultado favorável se mantém em faixas mais amplas de parâmetros e se poderia ser estendida a materiais mais sensíveis à ocorrência de porosidade, como ligas de alumínio por exemplo.

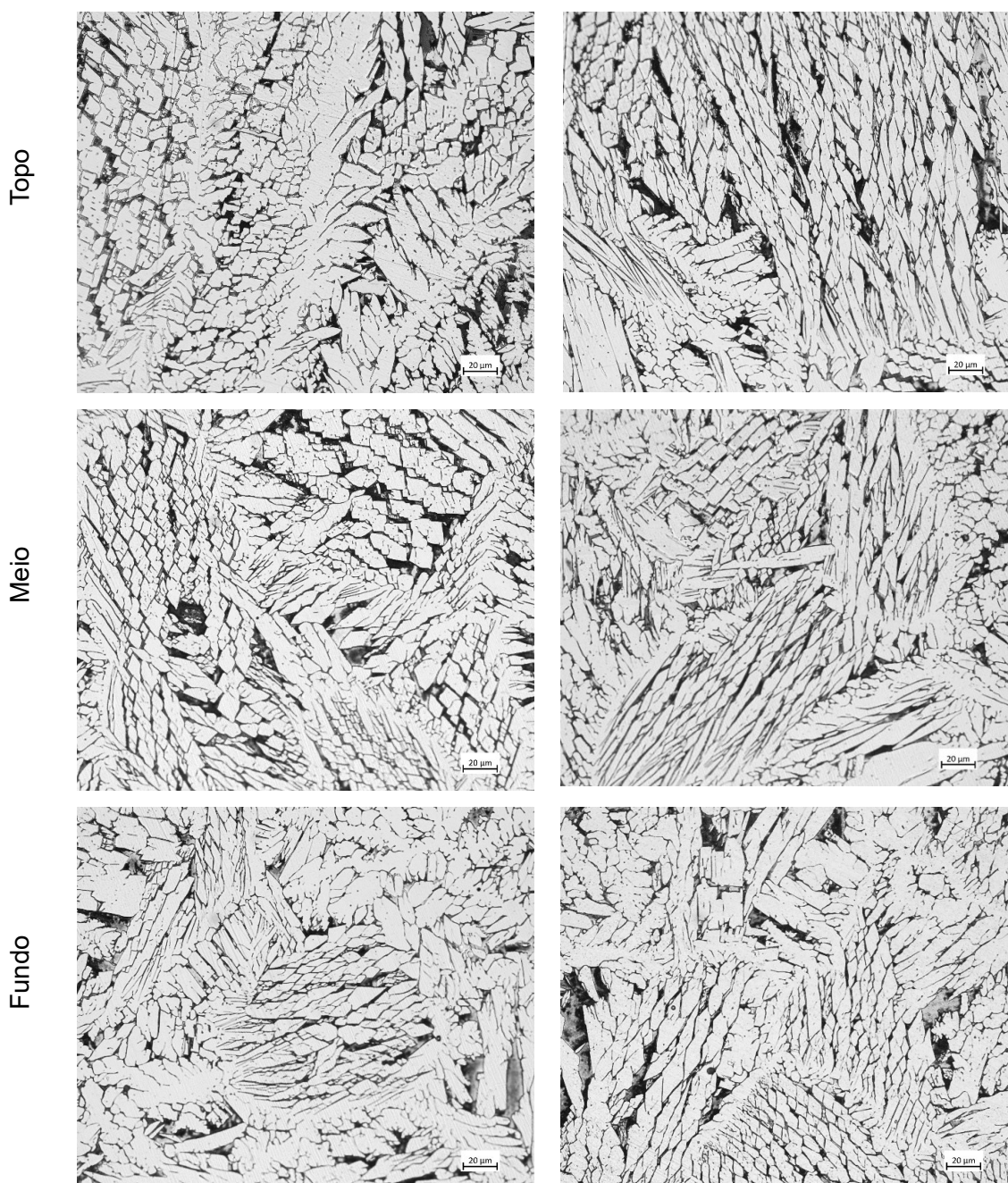


Figura 7.29 - Imagens representativas da microestrutura (ferrita: região escura; austenita: região clara) em função da posição no depósito (topo, meio e fundo): (esquerda) testes 1 – corrente pulsada sincronizada com alimentação pulsada a 2,2 m/min; (direita) testes 2 – corrente constante e alimentação pulsada a 1,7 m/min.

7.3.6 Análise termográfica

Tendo em vista o potencial que a técnica de pulsação de alimentação de arame sincronizada com a pulsação de corrente pode ter em termos de agir sobre a ação térmica do processo de deposição, foi também realizada uma avaliação de aspectos térmicos relacionados: tempo e taxa de resfriamento, temperatura na poça de fusão e logo atrás dela, e dimensões da poça de fusão. Para tanto, empregou-se a câmera termográfica XIR-1800 em conjunto com o software WeldStudio Pro, ambos da empresa Xiris Automation, conforme detalhado na seção 7.2.6.

7.3.6.1 Tempo e taxa de resfriamento

A Figura 7.30 apresenta a evolução do tempo de resfriamento entre 1000 °C e 600 °C, medido do meio quanto ao fim dos cordões obtidos com as duas condições de deposição principais (1A e 2A), em um comprimento de depósito logo atrás da poça (a partir de 10 mm atrás da linha média do eletrodo de tungstênio, estendendo-se por 35 mm). Inicialmente, nota-se que os tempos de resfriamento aumentam com o decorrer da deposição em ambas as condições, reflexo do aquecimento progressivo do cordão e da chapa durante a operação. Todavia, o que chama mais a atenção é que, para uma energia de soldagem equivalente, a condição com alimentação de arame pulsada sincronizada com a pulsação da corrente de soldagem (teste 1A) levou a menores tempos de resfriamento do que a condição de alimentação pulsada com corrente constante (teste 2A). Isso indica que a técnica sincronizada, ao dosar melhor o calor pela variação da corrente quando o arame entra na poça e ao permitir expandir o limite operacional da velocidade de alimentação, opera em condição térmica mais branda, o que tende a ser benéfico para aplicações em revestimentos e em manufatura aditiva por exemplo.

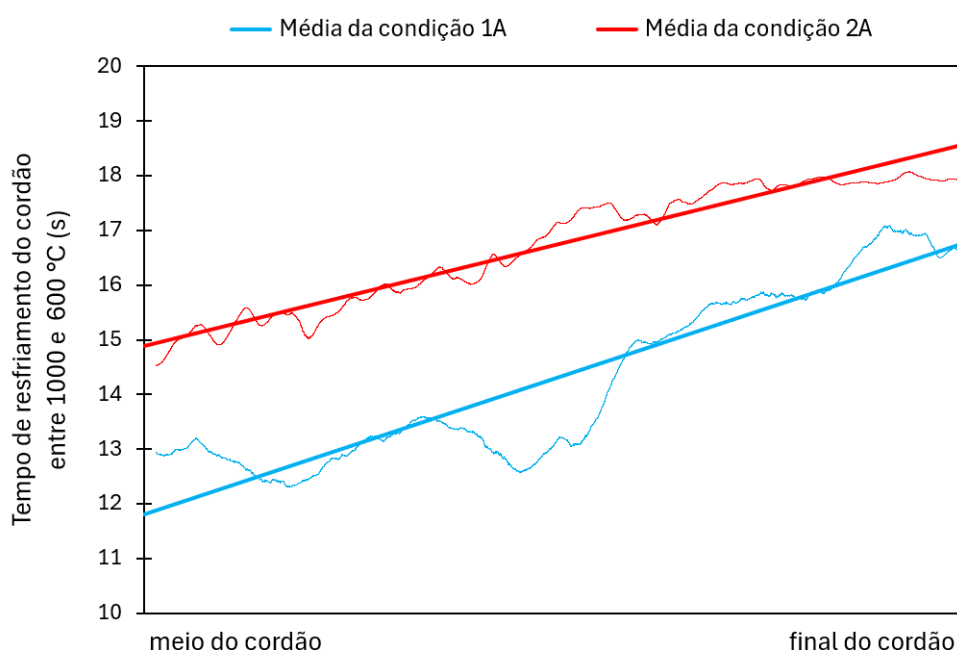


Figura 7.30 - Evolução dos tempos de resfriamento entre 1000 °C e 600 °C do trecho de 35 mm de depósito logo atrás da poça de fusão, do meio ao final do cordão, em função da condição de deposição. (teste 1A = corrente pulsada sincronizada com alimentação pulsada a 2,2 m/min; teste 2A = corrente constante com alimentação pulsada a 1,7 m/min).

No intuito de expressar melhor essa diferença entre os resfriamentos obtidos com as duas condições de deposição principais, a Tabela 7.19 lista os tempos de resfriamento entre 1000 °C e 600 °C no meio e ao final das deposições. Para o trecho avaliado, o tempo de resfriamento foi respectivamente 1,6 s e 1,1 s mais curto no meio e ao final do cordão na condição do teste 1A em relação à condição do teste 2A.

Tabela 7.19 - Tempos de resfriamento entre 1000 °C e 600 °C do trecho de 35 mm de depósito logo atrás da poça de fusão, calculados no meio e ao final do cordão, em função da condição de deposição.

Condição	Tempo de resfriamento no meio do cordão (s)	Tempo de resfriamento ao final do cordão (s)
1A	12,9	16,8
2A	14,5	17,9
Diferença (1A – 2A)	-1,6	-1,1

Como derivação direta dos tempos de resfriamento, a Figura 7.31 apresenta as taxas de resfriamento resultantes no intervalo de temperatura considerado. No inverso do observado para os tempos, as taxas de resfriamento caem com o decorrer da deposição em ambas as condições em consequência do acúmulo de calor no cordão e chapa em cada caso, porém a velocidade de resfriamento foi sempre maior no caso da deposição sincronizada. Como listado na Tabela 7.20, a taxa de resfriamento foi 3,4 °C/s maior no meio e 1,5 °C/s maior ao final do cordão para a condição do teste 1A em comparação à condição do teste 2A.

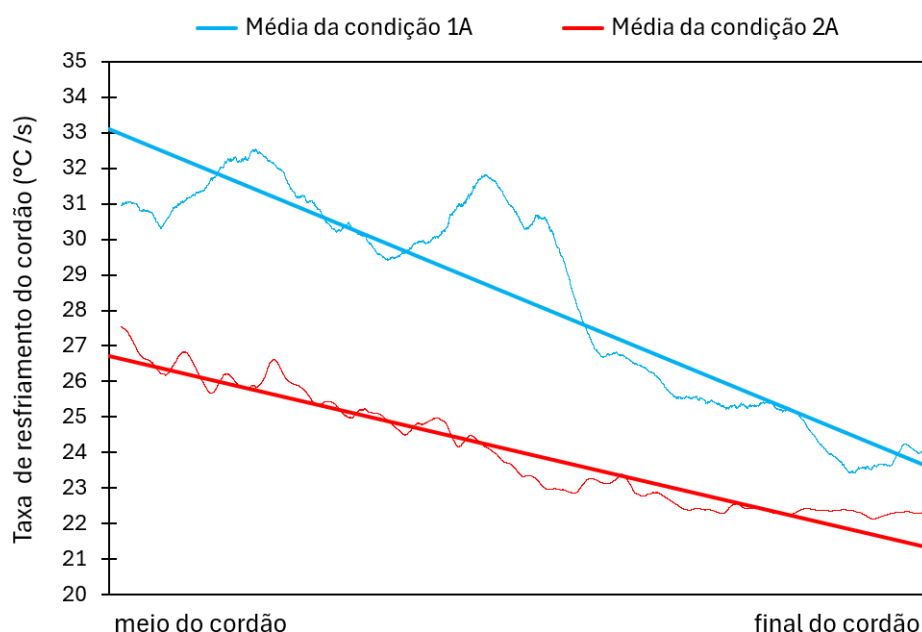


Figura 7.31 - Evolução das taxas de resfriamento entre 1000 °C e 600 °C do trecho de 35 mm de depósito logo atrás da poça de fusão, do meio ao final do cordão, em função da condição de deposição.

Tabela 7.20 - Taxa de resfriamento entre 1000 °C e 600 °C do trecho de 35 mm de depósito logo atrás da poça de fusão, calculada no meio e ao final do cordão, em função da condição de deposição.

Condição	Taxa de resfriamento no meio do cordão (°C/s)	Taxa de resfriamento ao final do cordão (°C/s)
1A	31,0	23,8
2A	27,6	22,3
Diferença (1A – 2A)	+3,4	+1,5

Apesar de não representar uma diferença numérica muito expressiva, esse resultado reforça o potencial da técnica sincronizada de operar em uma condição térmica mais branda. A diferença

moderada pode ser justificada pelo fato de a energia de soldagem ter sido equivalente entre as condições. Mesmo que o calor do arco seja utilizado de forma mais otimizada em instantes de maior intensidade para fundir mais material de adição (com subida da corrente na entrada/avanço do arame e descida da corrente na saída/recuo do arame) no caso sincronizado frente a uma mesma corrente ao longo do tempo na condição de referência com alimentação pulsada, pode ser assumido que o calor total aportado em ambos os casos acaba, após fundir mais material de adição e menos chapa no caso sincronizado, indo para o sistema cordão-chapa de maneira pouco diferente. Por fim, essa pequena diferença nas taxas de resfriamento acaba justificando a equivalência no balanço de fases austenita/ferrita observada nas amostras das duas condições de deposição principais (seção 7.3.5).

7.3.6.2 Temperaturas da poça de fusão e atrás da poça

Em complemento à análise dos parâmetros relacionados diretamente ao resfriamento do cordão, temperaturas na poça de fusão e imediatamente atrás dela foram obtidas para um comparativo entre as duas condições principais de deposição. A Figura 7.32 apresenta a evolução da temperatura mínima na região da poça de fusão, do meio ao fim dos cordões, para as condições dos testes 1A e 2A. Como se nota, os patamares de temperatura do material fundido foram relativamente estáveis em ambas as condições ao longo da deposição, provavelmente pelo fato da região de medição se localizar em um ponto dentro de campos de temperaturas muito elevadas e, portanto, menos sensível ao acúmulo progressivo de calor. Contudo, com a utilização da sincronização entre a pulsação da alimentação de arame e a pulsação da corrente de soldagem, o nível de temperatura mínimo da região examinada da poça foi razoavelmente reduzido (na média em torno de 122 °C menor do que na condição com corrente constante e alimentação pulsada (sem sincronização), o que reforça o potencial da técnica sincronizada de operar termicamente de forma mais branda.

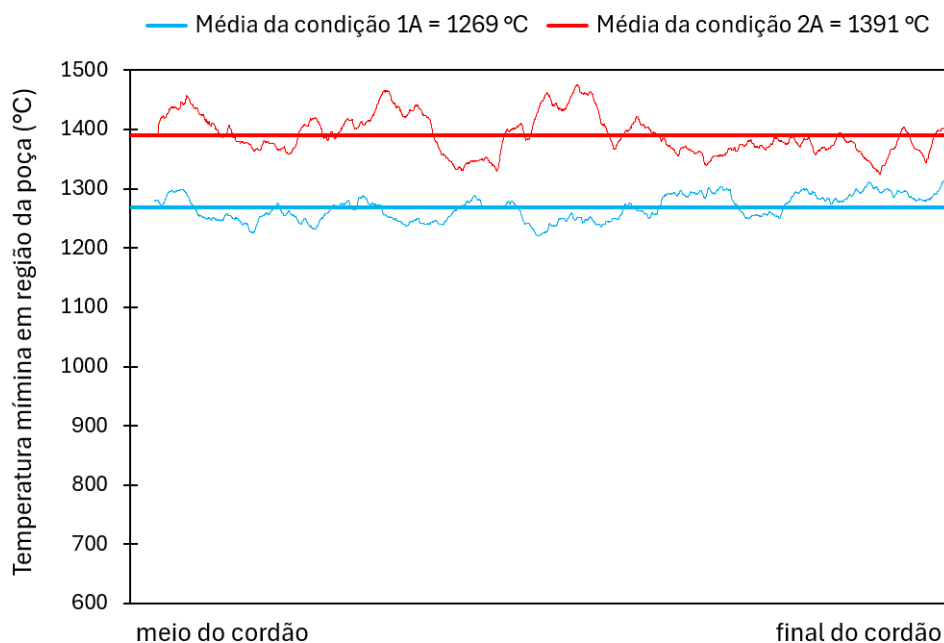


Figura 7.32 - Evolução da temperatura mínima na região da poça de fusão (janela de 10×10 pixels centralizada a 2 mm atrás da linha média do eletrodo de tungstênio e 1 mm acima da chapa) do meio ao final do cordão em função da condição de deposição.

Essa tendência é corroborada pelo comportamento da temperatura imediatamente atrás da poça, que é apresentado na Figura 7.33. A temperatura desse ponto, logo após a solidificação do material, mostrou-se igualmente estável ao longo das deposições, porém com a condição sincronizada exibindo temperatura média cerca de 117 °C menor em relação à condição com corrente constante e alimentação pulsada (sem sincronização).

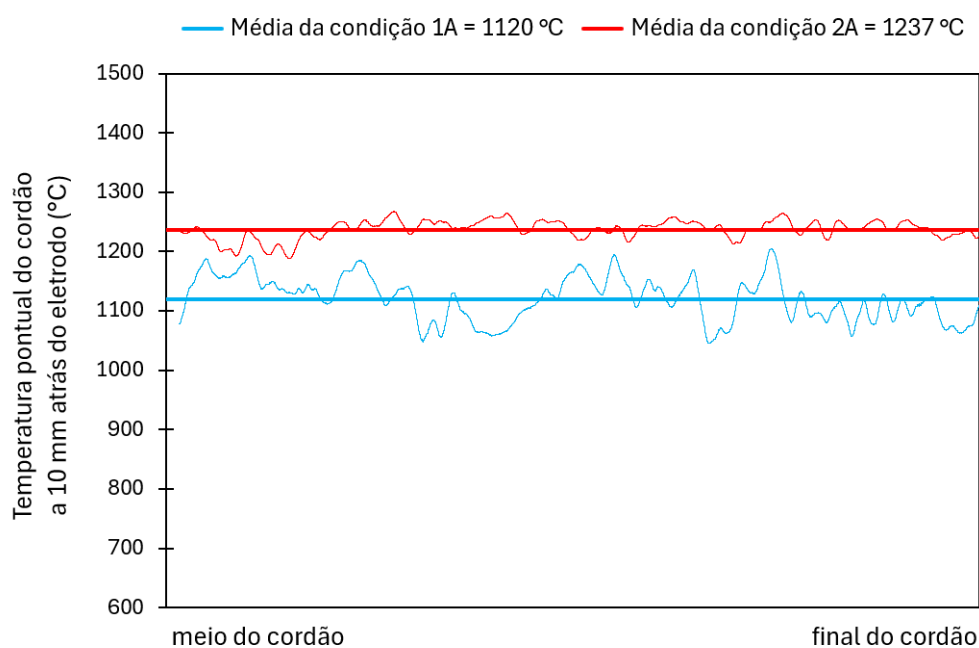


Figura 7.33 - Evolução da temperatura no ponto logo atrás da poça de fusão (pixel de $0,086 \times 0,086$ mm na meia altura do depósito localizado a 10 mm atrás da linha média do eletrodo de tungstênio) do meio ao final do cordão em função da condição de deposição.

Esses resultados termográficos, com o material ainda fundido e logo após a solidificação, podem também ser atribuídos ao fato de a técnica sincronizada dosar o calor (pela variação da corrente) de maneira mais adequada durante o ciclo de avanço e recuo do arame, além de por permitir operar com maior velocidade de alimentação (aproximadamente 30% maior), e consequentemente com maior capacidade de deposição, sem aumento da energia de soldagem, resultando em um processo termicamente menos intenso para o mesmo nível de produtividade.

7.3.6.3 Dimensões da poça de fusão

Por fim, os comprimentos da poça de fusão (frações frontal e traseira em relação à linha média do eletrodo de tungstênio, além do comprimento total) foram levantados no meio e ao final dos cordões para as duas condições de deposição consideradas como principais. A Tabela 7.21 os resultados relacionados ao tamanho da poça de fusão, enquanto a Figura 7.34 os resume graficamente.

Tabela 7.21 - Comprimentos parciais (medidos) e total (calculado) da poça de fusão no meio e ao final do cordão em função da condição de deposição (DP = desvio padrão).

Condição e local de medição no cordão	Comprimento da poça atrás da linha média do eletrodo de W (mm)							Comprimento da poça à frente da linha média do eletrodo de W (mm)							Poça total (mm)
	Medidas					Média	DP	Medidas					Média	DP	Média
1A no meio	8,17	8,22	8,13	8,30	8,15	8,17	0,07	1,82	1,91	1,86	2,03	1,95	1,91	0,08	10,08
1A ao final	8,43	8,39	8,64	8,35	8,43	8,43	0,11	2,09	2,04	2,21	2,17	2,04	2,09	0,08	10,52
2A no meio	7,89	7,85	7,81	8,01	7,93	7,89	0,08	1,13	1,34	1,30	1,26	1,42	1,30	0,11	9,19
2A ao final	8,16	8,03	8,08	8,12	8,21	8,12	0,07	1,56	1,39	1,52	1,48	1,31	1,48	0,10	9,60

Em um efeito geral e até esperado, a poça de fusão tendeu a crescer (tanto para trás quanto para frente em relação à posição do eletrodo) com o decorrer da deposição em ambas as condições, reflexo do acúmulo de calor nos cordões e chapas ao longo do tempo. Todavia, o dado mais relevante é que a poça (tanto para trás quanto para frente e, assim, no total), tanto no meio quanto ao fim da deposição, revelou-se maior na condição do teste 1A (com sincronização) do que na condição do teste 2A (sem sincronização). Esse comportamento pode ser explicado pelo fato de a técnica sincronizada ter depositado mais material, por poder operar com maior velocidade de alimentação (2,2 m/min) frente a condição de referência (1,7 m/min) sob energia de soldagem equivalente, sem que houvesse contato da ponta do arame com o substrato (chapa) no fundo da poça, mas com a corrente alternando entre valores de pico e de base na mesma frequência e de forma casada com avanço e recuo do arame. Tal combinação levou à formação de uma massa fundida mais extensa superficialmente ((maior espalhamento do depósito, corroborando os maiores

valores de largura observados anteriormente), apesar de operar em um regime térmico mais brando (menores temperaturas da poça e logo atrás dela e tempos de resfriamento mais curtos). Esse conjunto de efeitos se relaciona diretamente com as reduções de penetração e de diluição observadas na condição sincronizada e discutidas nas seções anteriores.

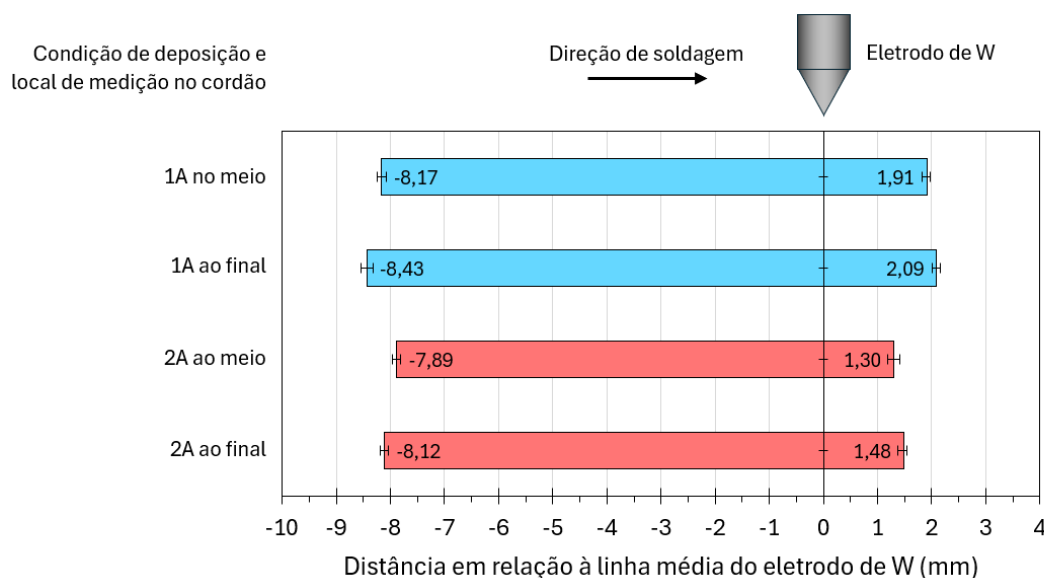


Figura 7.34 - Comprimentos parciais (frontal e traseiro) e total da poça de fusão no meio e ao final do cordão em função da condição de deposição.

7.4 Conclusões parciais

Os resultados obtidos neste capítulo demonstram que a técnica de pulsação da alimentação de arame sincronizada com a corrente pulsada de soldagem oferece ganho simultâneo de produtividade e qualidade em relação às condições de referência avaliadas. A condição sincronizada (corrente pulsada com alimentação pulsada, 1A/1B) foi a única capaz de operar a 2,2 m/min com estabilidade reprodutível, aproximadamente 30% acima do limite da condição de referência sem sincronismo (corrente constante com alimentação pulsada a 1,7 m/min, 2A/2B), confirmando que somente a atuação conjunta das duas pulsações viabiliza esse nível de capacidade de deposição. A condição com corrente constante e alimentação contínua (4A/4B) também atingiu 2,2 m/min, porém ao custo da ausência de controle sobre a interação arame-poça.

Do ponto de vista geométrico e metalúrgico, os depósitos sincronizados apresentaram maior largura e reforço, menor penetração e diluição, preservação superior de Cr e Ni (2,4% e 1,0%, respectivamente) e ausência de porosidade relevante, sem prejuízo à dureza (~220 HV) em relação à condição de referência (~227 HV). O balanço de fases resultou equivalente entre as condições (~21-23% de ferrita), porém abaixo da faixa recomendada para aços super duplex, sinalizando necessidade de otimização dos parâmetros para aplicações práticas. A análise termográfica confirmou que a dosagem temporal do aporte térmico pelo sincronismo direciona maior fração da energia para a fusão do metal de adição e reduz a interação com o metal de base, comportamento fisicamente coerente com a menor penetração e diluição observadas e com as taxas de resfriamento registradas.

CAPÍTULO VIII

CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos ao longo das seis etapas experimentais de avaliação da técnica de pulsação da alimentação de arame sincronizada com a corrente de soldagem no processo TIG como desenvolvida, as seguintes conclusões são estabelecidas em correspondência direta com os objetivos específicos inicialmente propostos:

1. Desenvolvimento e avaliação funcional do dispositivo pulsador. Em atendimento ao primeiro objetivo específico, o dispositivo pulsador de alimentação de arame baseado na flexão alternada de uma seção livre do conduíte mostrou-se funcional e tecnicamente viável. O mecanismo excêntrico com servo motor permitiu atingir amplitudes de pulsação na faixa de 2 a 15 mm, ajustáveis pela posição da luva de condução e pelo comprimento livre do conduíte, e frequências de até 25 Hz com boa concordância em relação aos valores ajustados. A concepção externa ao alimentador e à tocha confere ao dispositivo portabilidade e compatibilidade com sistemas de soldagem convencionais, sem necessidade de modificações nos equipamentos existentes.

2. Caracterização dinâmica do dispositivo pulsador. Em atendimento ao segundo objetivo específico, a filmagem em alta velocidade confirmou que a frequência de pulsação efetivamente transmitida ao arame acompanha com precisão a velocidade de rotação programada no servo motor em toda a faixa investigada (1 a 25 Hz). A amplitude de pulsação revelou-se pouco sensível ao diâmetro do arame dentro da faixa ensaiada (1,0 e 1,2 mm), e levemente inferior para arames de alumínio em relação ao aço carbono, comportamento atribuído à menor rigidez mecânica do alumínio. O modelo analítico simplificado proposto subestimou a amplitude de pulsação do arame, uma vez que adota a hipótese de que o conduíte descreve uma trajetória retilínea durante a flexão. Além disso, possíveis folgas entre o arame e o conduíte também podem ter contribuído para que a amplitude experimental fosse superior à prevista teoricamente.

3. Definição do envelope de trabalho. Em atendimento ao terceiro objetivo específico, o envelope operacional para o processo TIG com alimentação pulsada de arame foi estabelecido em função da corrente de soldagem (120 a 200 A) e da velocidade de alimentação de arame (0,2 a 2,0 m/min) para velocidade de soldagem de 10 cm/min. Por meio de deposições sobre chapas de aço carbono utilizando arame de aço inoxidável AWS 308L, verificou-se que a pulsação da alimentação de arame promoveu aumento do reforço e redução da largura dos cordões em comparação à alimentação contínua. Esse efeito foi mais pronunciado para as frequências de 11 e 20 Hz e foi atribuído ao mecanismo de arraste do metal líquido por tensão superficial durante o recuo do arame. O fenômeno de *wire stubbing* mostrou-se o principal fator limitante da janela operacional nas

combinações de corrente baixa (120 A) e velocidade de alimentação de referência (1,0 m/min), bem como em corrente de referência (160 A) e alta velocidade de alimentação (2,2 m/min), evidenciando limites para a operação sem sincronismo.

4. Efeitos da pulsação da alimentação de arame sobre a geometria, o perfil de penetração e a ocorrência de descontinuidades. Em atendimento ao quarto objetivo específico, a análise dos cordões produzidos no envelope de trabalho revelou que frequência e amplitude de pulsação do arame exercem efeitos distintos e, em parte, antagônicos sobre a diluição: enquanto o aumento da frequência tendeu a reduzi-la, o aumento da amplitude promoveu seu crescimento, comportamento atribuído à redução do tempo de permanência do arame na região da fonte térmica e ao consequente enfraquecimento do efeito de resfriamento do metal de adição sobre a poça. Adicionalmente, a alimentação pulsada alterou o perfil de penetração, que passou a se concentrar na região central do cordão, sugerindo modificações nos mecanismos de circulação do metal líquido e na distribuição interna de calor na poça. Quanto a descontinuidades, houve ocorrência de porosidade e essa esteve mais associada à frequência do que à amplitude de pulsação do arame, com redução da incidência de poros com o aumento da frequência, o que foi atribuído à maior agitação da poça e à consequente facilitação da expulsão de gases antes da sua solidificação.

5. Desenvolvimento do sistema de sincronismo. Em atendimento ao quinto objetivo específico, a tensão eletrodo-arama (V_{EA}) demonstrou ser variável de controle eficaz para a detecção em tempo real dos eventos de estabelecimento e ruptura da ponte metálica, viabilizando o sincronismo entre a pulsação do arame e a pulsação da corrente de soldagem. O sistema implementado em LabVIEW® apresentou latência de comutação inferior a 10 ms em toda a faixa de frequências avaliada, o que se considera aceitável/adequado para as frequências de operação investigadas. Dentre as duas versões de programa implementadas, a Versão 2 (baseada em intervalo temporal fixo de meio período para a aplicação da corrente de pico) mostrou-se superior para estabilidade da corrente média (variação inferior a 1%), sendo adotada como estratégia de referência nos ensaios em que se buscou comparar diferentes condições de soldagem sob a mesma energia média. O desenvolvimento do modo "TIG SINCRO" na fonte de soldagem, realizado em parceria com o fabricante, constituiu contribuição tecnológica adicional por ampliar a capacidade operacional do equipamento.

6. Ampliação do envelope de trabalho pelo sincronismo. Em atendimento ao sexto objetivo específico, a introdução do sincronismo entre a pulsação do arame e a corrente de soldagem viabilizou a operação estável em regiões do envelope de trabalho anteriormente inviáveis sob corrente constante e alimentação de arame pulsada (120 A com $V_a = 1,0$ m/min e 160 A com $V_a = 2,2$ m/min). Esse resultado evidencia que a dosagem temporal do aporte térmico (concentrando a corrente de pico nos instantes de contato do arame com a fonte térmica) promove fusão mais

eficiente do metal de adição sem necessidade de elevação da energia média de soldagem. A demonstração experimental de que somente a atuação conjunta e sincronizada de ambas as pulsações (corrente e alimentação) viabiliza essas condições representa contribuição inédita para o estado da arte do processo TIG com alimentação pulsada de arame.

7. Efeitos do sincronismo sobre a geometria dos cordões. Complementarmente ao sexto objetivo específico, sob corrente pulsada sincronizada com alimentação pulsada (Programa V2, 15 Hz, amplitude ~6 mm), a largura dos cordões foi reduzida em aproximadamente 20%, a penetração em 17% e a diluição em 20% em relação à condição de 2 Hz, tendência consistente com a observada sob corrente constante e que se mantém independentemente da estratégia de corrente adotada. A inversão da lógica de sincronismo (corrente de base durante o contato do arame) confirmou experimentalmente que a estratégia direta (corrente de pico durante o avanço) é a condição fisicamente favorável e produz resultados geométricos mais estáveis.

8. Capacidade de deposição e estabilidade operacional com arame de aço inoxidável super duplex. Em atendimento ao sétimo objetivo específico, na avaliação com arame ER2594 (aço inoxidável super duplex), a configuração sincronizada (corrente pulsada + alimentação pulsada em 15 Hz e ~6 mm) alcançou velocidade limite de alimentação de 2,2 m/min, superando em aproximadamente 30% o limite de 1,7 m/min da condição de referência com corrente constante e alimentação pulsada, sob energia de soldagem equivalente. Configurações sem sincronismo (corrente constante + alimentação pulsada, e corrente pulsada + alimentação contínua) não foram capazes de operar a 2,2 m/min, confirmando que o sincronismo é condição necessária para esse nível de capacidade de deposição.

9. Características geométricas e metalúrgicas dos depósitos sincronizados. Complementarmente ao sétimo objetivo específico, os depósitos obtidos com a técnica sincronizada apresentaram maior largura e reforço, menor penetração e menor diluição geométrica em comparação à condição de referência com corrente constante e alimentação pulsada, com ausência de porosidade relevante em todas as condições avaliadas. Os perfis de microdureza mostraram-se uniformes e equivalentes entre as condições (~220 a 227 HV) apesar da diferença de 30% na velocidade de alimentação, demonstrando que o ganho de produtividade a princípio não compromete o despenho mecânico dos depósitos. A análise por EDS revelou preservação média de 2,4% a mais de Cr e 1,0% a mais de Ni nos depósitos produzidos de forma sincronizadas, reflexo direto da maior quantidade de metal de adição incorporada por unidade de comprimento de cordão. O balanço de fases (ferrita/austenita) resultou equivalente entre as condições (~21 a 23% de ferrita), embora com maior variabilidade na condição sincronizada, sugerindo influência da ciclicidade térmica do sincronismo sobre a formação local de fases (aspecto carente de investigação futura).

10. Comportamento térmico da técnica sincronizada. Em continuidade ao sétimo objetivo específico, a análise termográfica demonstrou que a condição sincronizada operou consistentemente em regime térmico mais brando em comparação à condição de referência com corrente constante e alimentação pulsada sob energia de soldagem equivalente. A temperatura mínima da região da poça de fusão foi em média 122 °C inferior, a temperatura imediatamente atrás da poça foi 117 °C inferior, e os tempos de resfriamento do cordão entre 1000 °C e 600 °C foram menores na condição sincronizada. A poça de fusão mostrou-se maior na condição sincronizada ao longo de toda a deposição, reflexo do maior volume de material depositado pela maior velocidade de alimentação, o que resultou em maior espalhamento lateral do depósito e, simultaneamente, em menores penetração e diluição. Tal conjunto de informações confirma que a dosagem temporal do aporte térmico pelo sincronismo direciona maior fração da energia disponível para a fusão do metal de adição e reduz a interação térmica com o metal de base, o que é coerente com as menores penetração e diluição observadas.

CAPÍTULO IX

TRABALHOS FUTUROS

Com base nos resultados obtidos e nas limitações identificadas em relação à técnica de pulsação da alimentação de arame sincronizada com a corrente de soldagem no processo TIG como desenvolvida, propõem-se os seguintes desdobramentos:

1. Redução de latência por predição do instante de contato do arame. O sistema de sincronismo atual apresenta latência de comutação resultante de duas contribuições: o tempo de detecção do evento de contato via V_{EA} (tensão eletrodo-arama) e o tempo de resposta da fonte de soldagem à solicitação de mudança de corrente. Em frequências elevadas, essa latência combinada representa fração crescente do período e pode comprometer a precisão do sincronismo. Uma estratégia para complementar a abordagem utilizada nesta tese consiste em desenvolver um estimador de estado baseado no sinal de V_{EA} capaz de modelar a dinâmica oscilatória do arame e prever o instante de contato com a poça de fusão antecipadamente ao evento real. Com isso, seria possível antecipar o comando de comutação à fonte e compensar ambas as parcelas de latência, ampliando a faixa de frequências em que o sincronismo opera com eficácia.

2. Aplicação em manufatura aditiva por deposição arco elétrico (MADA). Avaliar a técnica de alimentação pulsada sincronizada com corrente pulsada em deposições multicamada para manufatura aditiva com processo TIG, investigando seus efeitos sobre a regularidade geométrica das paredes, o gradiente térmico entre camadas, a microestrutura resultante e as propriedades mecânicas de peças fabricadas. O aporte térmico mais brando demonstrado neste trabalho sugere potencial da técnica desenvolvida para esse tipo de aplicação.

3. Otimização do balanço de fases em depósitos de aço inoxidável super duplex. Realizar estudo paramétrico variando frequência, amplitude de pulsação do arame e níveis de corrente de pico e base com o objetivo de identificar combinações que conduzam ao balanço ferrita/austenita dentro da faixa normativa. Sugere-se ainda incluir avaliação por seções longitudinais dos depósitos para mapear a variação do balanço de fases ao longo do comprimento do cordão e verificar se a heterogeneidade observada neste trabalho se confirma ou pode ser minimizada pela otimização dos parâmetros de pulsação.

4. Extensão a outras ligas e processos de soldagem. Avaliar a técnica sincronizada para deposição de outros materiais de relevância industrial. Investigar especificamente os efeitos da pulsação sobre a formação de porosidade em ligas de alumínio (material reconhecidamente sensível a esse defeito), verificando se a agitação promovida pelo arame pulsado favorece ou não a degaseificação da poça.

5. Avaliação da técnica em soldagem fora da posição plana. Investigar o desempenho da alimentação pulsada sincronizada nas posições vertical ascendente, vertical descendente, horizontal e sobrecabeça, bem como em soldagem orbital de tubos. A ação do arame pulsado como sumidouro térmico localizado e o controle sobre a dinâmica da poça de fusão sugerem potencial para ampliar o envelope operacional em posições desfavoráveis, nas quais o controle do escoamento da poça é crítico para a qualidade do cordão.

6. Aplicação de inteligência artificial para otimização e controle do processo. Desenvolver modelos de aprendizado de máquina (redes neurais, algoritmos evolutivos ou lógica fuzzy) treinados com os dados experimentais obtidos nesta tese para prever a geometria do cordão em função dos parâmetros de pulsação e sincronismo, e para identificar automaticamente os limiares de V_{EA} (tensão eletrodo-aramé) adequados para cada condição de processo. A detecção automática de instabilidades (como *wire stubbing* e irregularidades da transferência metálica) a partir dos sinais elétricos, com atuação corretiva em tempo real, constitui extensão de alto valor prático.

7. Avaliação de desempenho em serviço dos revestimentos produzidos. Submeter amostras de revestimento de aço inoxidável super duplex ER2594 e mesmo de outros materiais obtidas com a técnica sincronizada a ensaios de resistência à corrosão e a outros mecanismos de desgaste, comparando os resultados com revestimentos produzidos por configurações não sincronizadas e com valores de referência da literatura. A maior preservação de Cr e Ni especificamente demonstrada nos depósitos obtidos com a técnica sincronizada aponta para desempenho anticorrosivo superior, mas precisa-se ainda comprovar e quantificar tal hipótese experimentalmente.

8. Modelagem numérica da interação arame-arco-poça sob pulsação sincronizada. Desenvolver modelo termomecânico por elementos finitos ou volumes finitos que represente a interação entre o arame pulsado, o arco elétrico e a poça de fusão, integrando a variação cíclica da corrente sincronizada com o movimento do arame. O modelo deve ser capaz de prever a distribuição de temperatura na poça, o padrão de convecção, a geometria do cordão e a taxa de resfriamento em função dos parâmetros de pulsação e sincronismo, fornecendo ferramenta auxiliar para reduzir o esforço experimental de parametrização e explorar configurações não facilmente acessíveis por via experimental.

9. Transferência tecnológica e avaliação industrial da solução desenvolvida. Conduzir estudo de validação industrial do dispositivo pulsador em ambiente produtivo real, avaliando robustez, facilidade de uso, tempo de setup e impacto sobre indicadores de produtividade (taxa de deposição, velocidade de soldagem, taxa de rejeição) em aplicações como de revestimento e soldagem estrutural. Sugere-se também a uma comparação com sistemas comerciais proprietários (TIPTIG®, tigSpeed®) em termos de desempenho técnico e custo.

CAPÍTULO X

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CUNHA, TIAGO VIEIRA DA; SANTOS, FELIPE JOSÉ DOS; VOIGT, ANNA LOUISE. Study on the influence of operational conditions on weld bead morphology produced through TIG process with longitudinal wire oscillation. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, v. 44, p. 292, 2022. DOI: 10.1007/s40430-022-03582-z.

<https://doi.org/10.1007/s40430-022-03582-z>

DORNELLES, J. M. Análise da influência da frequência de alimentação dinâmica de arame na soldagem com processo plasma de aço inoxidável 309L aplicada à manufatura aditiva. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2022.

EWM GROUP. TIG welding processes - TIGSpeed®. Disponível em: <<https://www.ewm-group.com/en/innovation-research/tig-welding-processes.html>>. Acesso em: 9 mar. 2018.

FORTAIN, J. M.; RIMA, N. O. L.; VAIDYA, V. Innovative process improves welding of sheet metal parts. *Welding Journal*, v. 87, p. 2-8, 2008.

FRONIUS INTERNATIONAL GMBH. CMT: Cold Metal Transfer. São Bernardo do Campo, 2014. Disponível em: <http://www.fronius.com/cps/rde/xbcr/SID-288FCE80-FC95C839/fronius_brasil/CMT_cold_metal_transfer_pt.pdf>. Acesso em: 1 maio 2018.

FRONIUS INTERNATIONAL GMBH. iWave 300i-500i: Operating Instructions. Wels: Fronius International GmbH, 2022. Seção "TIG DynamicWire".

GRIBACHEV, V. P. Device for pulse feed of welding wire. SU1648687A1, 1991.

IMC SOLDAGEM. STA-TIG: Sistema de Tacionamento de Arame - Manual de Instruções. Florianópolis: IMC Soldagem, 2006.

JORGE, V. L.; SANTOS, C. H. A.; SCOTTI, F. M.; LARQUER, T. R.; MOTA, C. P.; REIS, R. P.; SCOTTI, A. Desenvolvimento e Avaliação de Técnicas para Pulsação da Alimentação de Arame em Soldagem a Arco. *Soldagem & Inspeção*, v. 23, n. 3, p. 326-339, 2018. DOI: 10.1590/0104-9224/SI2303.03. <https://doi.org/10.1590/0104-9224/si2303.03>

JORGE, V. L.; SCOTTI, F. M.; REIS, R. P.; SCOTTI, A. The effect of pulsed cold-wire feeding on the performance of spray GMAW. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 107, p. 3485-3498, 2020a. DOI: 10.1007/s00170-020-05247-4.

<https://doi.org/10.1007/s00170-020-05247-4>

JORGE, VINICIUS LEMES; SCOTTI, FERNANDO MATOS; REIS, RUHAM PABLO; SCOTTI, AMÉRICO. Wire feed pulsation as a means of inducing surface tension metal transfer in Gas Metal Arc Welding. *Journal of Manufacturing Processes*, v. 62, p. 655-669, jan. 2020b.

<https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.12.072>

JORGE, VINICIUS LEMES; SCOTTI, FERNANDO MATOS; REIS, RUHAM PABLO; SCOTTI, AMÉRICO. The potential of wire feed pulsation to influence factors that govern weld penetration in GMA welding. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 110, p. 2685-2701, set. 2020c.

<https://doi.org/10.1007/s00170-020-06037-8>

KARPOV, G. G. Appts for pulsed feed of electrode wire. SU1127719A, 1984.

KIEV IND. Device for pulsed feeding of welding wire. SU1814992A, 1994.

MARQUES, C. Análise de técnicas e efeitos físicos da alimentação dinâmica do arame no processo de soldagem MIG/MAG com vistas ao desenvolvimento de um sistema nacional flexível. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis - SC. 2017.

MILLS, K.; KEENE, B.; BROOKS, R.; SHIRALI, A. Marangoni effects in welding. *Phil Trans R Soc Lond A* 356:911-925, 1998. <https://doi.org/10.1098/rsta.1998.0196>

<https://doi.org/10.1098/rsta.1998.0196>

NORSOK M-601: Welding and Inspection of Piping. 2016.

OMSK POLITEKHN INST. Device for pulse feeding of welding wire. SU1472197A, 1987.

PAES, L. E. S. Soldagem TIG orbital: técnica de alimentação dinâmica do arame visando aumento na produtividade. 2016. 206 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

PATON ELECTROWELD IND. Electromagnetic appts for pulsed feeding of welding wire. SU1107977A, 20 maio 1983.

PATON ELECTROWELD IND. Appts for pulsed feeding of welding wire. SU646524, 21 fev. 1977.

PATON ELECTROWELD IND. Appts for pulsed feeding of electrode wire. SU1433677A, 5 jan. 1987.

PATON ELECTROWELD IND. Clamp for pulsed feeding of welding wire. SU1337214A, 11 mar. 1986.

PIGOZZO, I. O.; SILVA, R. H. G. E.; GALEAZZI, D.; PEREIRA, A. S. Pulsed dynamic wire feeding with low insertion angle in GTAW process: a metal transfer characterization. *Welding in the World*, v. 66, p. 1891-1902, 2022. DOI: 10.1007/s40194-022-01352-y.
<https://doi.org/10.1007/s40194-022-01352-y>

PIGOZZO, I. O.; SILVA, R. H. G. E.; VIVIANI, A. B.; MEURER, G. Comparison of hot-wire and cold-wire GTAW with dynamic wire feeding of Inconel 625 deposits for cladding applications. In: *Rio Oil & Gas Expo and Conference (ROG.e)*, 2024a. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás, 2024. ISSN 2525-7579.
<https://doi.org/10.48072/2525-7579.roge.2024.3146>

PIGOZZO, I. O.; SILVA, R. H. G. E.; VIVIANI, A. B. A novel monitoring and characterization approach of dynamic wire feeding in GTAW process. In: *77th IIW Annual Assembly and International Conference*, 2024b. Singapore: International Institute of Welding, 2024. Documento XY-ZWTQ-2024.

PIKE, G. Evaluation of the TIP TIG welding system, a semi-automatic hot wire GTAW process. *Newport News: Newport News Shipbuilding*, 2013.

PLASCH, S. Device for feeding a welding wire to a welding device. US Patent No. US 2016/0059342, 2014.

PLASCH, S. Device for feeding a welding wire to a welding device. US9770778B2, 2016.

RANJBAR, K. et al. Weld overlaying of corrosion-resistant filler metals on A516 G-70 carbon steel. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, v. 216, 2025.
<https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2025.105514>

RIFFEL, K. C.; SILVA, R. H. G.; HAUPT, W.; SILVA, L. E.; DALPIAZ, G. Effect of Dynamic Wire in the GTAW Process: Microstructure and Corrosion Resistance. *Journal of Materials Processing Technology*, 2020. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2020.116758.

<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.116758>

RIFFEL, K. C.; SILVA, R. H. G.; DALPIAZ, G.; MARQUES, C.; SCHWEDERSKY, M. B. Keyhole GTAW with dynamic wire feeding applied to orbital welding of 304L SS pipes. *Soldagem & Inspeção*, v. 24, e2418, 2019. DOI: 10.1590/0104-9224/SI24.18.

<https://doi.org/10.1590/0104-9224/si24.18>

RUDY, J. F. Development and application of dabber gas tungsten arc welding for repair of aircraft engine seal teeth. In: *ASME International Gas Turbine Conference and Exhibit*, v. 2, London, 1982.

<https://doi.org/10.1115/82-GT-55>

SANTANGELO, M.; SILWAL, B.; PURDY, A. Vibration assisted robotic hot-wire gas tungsten arc welding (GTAW) for additive manufacturing of large metallic parts. In: *26th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium - An Additive Manufacturing Conference*, Austin, 2016.

SANTANGELO, M. SILWAL, B.; Effect of vibration and hot-wire gas tungsten arc (GTA) on the geometric shape. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 251, p. 138-145, 2018.

<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.08.010>

SANTOS, C. H. A. Desenvolvimento de um protótipo para pulsação da alimentação de arame na soldagem TIG. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecatrônica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2016.

SILVA, R. H. G. et al. TIG welding process with dynamic feeding: a characterization approach. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 96, p. 4467-4475, 2018.

<https://doi.org/10.1007/s00170-018-1929-6>

SILVA, R. H. G.; PAES, L. E. S.; MARQUES, C.; RIFFEL, K. C.; SCHWEDERSKY, M. B. Performing higher speeds with dynamic feeding gas tungsten arc welding (GTAW) for pipeline applications. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, v. 41, n. 1, 38, 2019a. DOI: 10.1007/s40430-018-1529-2.

<https://doi.org/10.1007/s40430-018-1529-2>

SILVA, R. H. G.; RIFFEL, K. C.; OKUYAMA, M. P.; DALPIAZ, G. Effect of dynamic wire in the GTAW process. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 269, p. 91-101, 2019b. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2019.02.007.

<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.02.007>

SILVA, R. H. G. E.; SCHWEDERSKY, M. B.; ROSA, A. F. Evaluation of TOPTIG technology applied to robotic orbital welding of 304L pipes. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, v. 188, 104229, 2020. DOI: 10.1016/j.ijpvp.2020.104229.

<https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2020.104229>

SILVA, R. H. G.; DORNELLES, J. M.; MARQUES, C.; SCHWEDERSKY, M. B. Análise da influência oscilográfica, elétrica e geométrica da frequência de alimentação dinâmica de arame na soldagem com processo plasma de aço inoxidável 309L com vistas à manufatura aditiva. In: CONGRESSO NACIONAL DE SOLDAGEM, 46.; CONGRESSO BRASILEIRO DE MANUFATURA ADITIVA, 2., 2024, Uberlândia. Anais... Uberlândia: ABS, 2024.

WILSON, M. TIP TIG: new technology for welding. *Industrial Robot: An International Journal*, v. 34, n. 6, p. 462-466, 2007.

<https://doi.org/10.1108/01439910710832057>

YUDODIBROTO, B. Y. B.; HERMANS, M. J. M.; HIRATA, Y.; DEN OUDEN, G. Influence of filler wire addition on weld pool oscillation during gas tungsten arc welding. *Science and Technology of Welding and Joining*, v. 9, n. 2, p. 163-168, 2004. DOI: 10.1179/136217104225012274.

<https://doi.org/10.1179/136217104225012274>

YURGINSK MASH ZD. Apparatus for pulsed feeding of welding wire using two electromagnets. SU1827989A3, 1995.

ANEXO 1

voestalpine Böhler Welding Soldas do Brasil Ltda

voestalpine Böhler Welding Soldas do Brasil Ltda

Rua Arnaldo Magnicaro nº 371
04691-060 - São Paulo - SP
Tel: (11) 5694 8377 - Fax: (11) 5631 4682

E-mail: info.welding@voestalpine.com
Site: www.voestalpine.com/welding

FUNDAÇÃO DE APOIO UNIVERSITÁRIO

R FRANCISCO VICENTE FERREIRA 126
38408-102 UBERLÂNDIA
Brasil

CERTIFICADO DA QUALIDADE

Certificate Schedule F

conforme / as per : ASME/AWS A5.01

No. : 2025-000290539-1-10-107996-004

Rev. 0

Página / Page : 1 / 1

Feição No	PO no.	038310	de / of	02.09.2025
Ordem de Produção	Order no.	1005470877		
Fatura	Delivery note/pos./split	2005556927/000010/900001	de / of	23.09.2025
Produto	Product	Arame Sólido (MIG) / GMAW wire electrode		
Designação da Marca	Trade name	Thermanit 25/09 CuT		
Classificação	Standard designation	EN ISO 14343-A - G 25 9 4 N L		
		AWS A5.9: ER2594		
Dimensão	Dimension	1,2 mm		
Corrida	Heat no.	107996		
Quantidade	Quantity	150,0 KG		

Análise Química % do produto

Chemical composition in % of the product

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	W	Cu	N				
0,02	0,4	0,9	0,021	0,002	25,7	3,8	9,8	0,5	0,5	0,21				

propriedades mecânicas

Mechanical properties

Ensaio de Tração							
Tensile test							
T	ReL / Rp 0,2	Rp 1,0	Rm	A (Lo = 4d)	Z	WBH	Observações
	MPa	MPa	MPa	%	%	PWHT	Remarks
20°C			≥ 760	≥ 15			

Fabricado e inspecionado em 04.09.2025

Lugar / Town
Sao Paulo

Data / Date
24.09.2025

Impresso por computador, válido sem assinatura
This certificate was issued by DP-equipment and does not require signature.

Representante da Qualidade Autorizado / Authorized representative
JOSÉ DAMASCENO

voestalpine

ONE STEP AHEAD.