



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

Ivan Olszanski Pigozzo

**Alimentação dinâmica de arame com baixo ângulo de inserção no processo
TIG**

Florianópolis

2025

Ivan Olszanski Pigozzo

**Alimentação dinâmica de arame com baixo ângulo de inserção no processo
TIG**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Mecânica da Universidade Federal
de Santa Catarina como requisito parcial para a
obtenção do título de Doutor em Engenharia
Mecânica

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

Florianópolis

2025

Pigozzo, Ivan Olszanski

Alimentação dinâmica de arame com baixo ângulo de inserção no processo TIG / Ivan Olszanski Pigozzo ; orientador, Prof. Régis Henrique Gonçalves e Silva, 2025.
243 p.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Florianópolis, 2025.

Inclui referências.

1. Engenharia Mecânica. 2. Soldagem. 3. Processo TIG. 4. Alimentação dinâmica de arame. 5. Monitoramento e controle de processos. I. Silva, Prof. Régis Henrique Gonçalves e. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

Ivan Olszanski Pigozzo

**Alimentação dinâmica de arame com baixo ângulo de inserção no processo
TIG**

O presente trabalho em nível de Doutorado foi avaliado e aprovado, em 13/12/2024, pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Américo Scotti, Dr. Eng
UFU - Universidade Federal de Uberlândia

Prof. Carlos Enrique Niño Bohórquez, Dr. Eng.
UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

Eng. Clóvis Ribeiro Rodrigues, Dr. Eng.
Petrobras

Certificamos que esta é a versão original e final do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica

Prof. Henrique Simas, Dr. Eng.
Coordenação do Programa de Pós-Graduação

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

Florianópolis, 2025

Ao meu filho Vicente.

AGRADECIMENTOS

Durante toda minha jornada, raramente trilhei meus caminhos sozinho. No doutorado não foi diferente. Para a conclusão deste trabalho, contei com a colaboração de muitas pessoas, cada uma com sua experiência e conhecimento, não menos ou mais importante que o outro, mas todos, de alguma forma, fundamentais. Listar o nome de cada um não seria uma tarefa fácil, entretanto, não poderia deixar de expressar meus agradecimentos aqueles que foram essenciais para o desenvolvimento deste trabalho.

Inicialmente agradeço ao Prof. Régis pela orientação e disposição, e pela oportunidade de retornar ao LABSOLDA após um período de 5 anos, desde minha defesa de mestrado. Aos colegas Fernando Costenaro e Rafael Horn que sempre se dispuseram e atenderam às demandas do trabalho, resolvendo quaisquer problemas eletrotécnicos que surgiram ao longo do caminho, além de compartilharem o melhor cafezinho do laboratório. Agradeço também a João Facco, pelo projeto e suporte referente aos módulos de alimentação de arame utilizados, fundamentais para que esta pesquisa acontecesse. Aos pesquisadores Alberto Bonamigo e Daniel Galeazzi, pela amizade e profundas reflexões ao longo desses quatro anos de pesquisa. Expresso também meus sinceros agradecimentos a todos os demais membros do LABSOLDA.

Gostaria de agradecer também às instituições que viabilizaram esta tese de doutorado. À Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), ao LABSOLDA e às instituições CNPq, CAPES e Petrobras pelo financiamento e suporte à pesquisa.

Também não posso deixar de agradecer à minha família. Minha mãe Sônia e meu pai Victor, que mesmo distantes, sempre estiveram presentes. Aos meus irmãos Victor e Hugo pela parceria da vida. Obrigado pelo carinho e amor, e pela liberdade de poder trilhar meus próprios caminhos. Amo vocês.

Minha sincera e carinhosa gratidão à minha esposa e companheira Juliana Okawati, que apesar de sempre reclamar do “cheiro de solda” que eu levava para casa, sempre esteve ao meu lado, me apoiando em todas as decisões e momentos difíceis.

Por fim, agradeço ao meu filho Vicente, que sempre se fascinou pela soldagem. Pelo encanto sincero por aquilo que, muitas vezes, fora o meu desencanto. Pela razão da qual eu saía de casa todos os dias, e querer voltar. Querido filho, trocaria qualquer

segundo que passei na bancada de ensaios para estar com você, na bancada da vida, aprendendo a ser humano.

“A consciência só é possível por meio da mudança,
a mudança só é possível com movimento.”

ALDOUS HUXLEY, *A Arte de Ver* (1942)

RESUMO

Com o avanço das tecnologias de soldagem, variantes do processo TIG, como TIPTIG e TOPTIG, destacam-se pela promessa de maior produtividade e qualidade, incorporando inovações como alimentação dinâmica e inserção em baixo ângulo. No entanto, a escassez de estudos técnicos sobre seus efeitos reais ressalta a necessidade de pesquisas mais aprofundadas. Nesse sentido, o presente trabalho tem como objetivo caracterizar o processo TIG conciliando ambas as variantes, isto é, alimentação dinâmica e inserção de topo, baseando-se nos eventos de transferência metálica bem como as influências dos parâmetros do processo sobre aspectos macro e microestruturais dos cordões. Para tanto, foram empregados métodos de monitoramento e controle fundamentados na aquisição de sinais elétricos, sobretudo a tensão entre o metal de adição e eletrodo, bem como filmagens em alta velocidade e termografia infravermelha. Dos resultados obtidos, ressalta-se a forte influência da alimentação dinâmica de arame sobre a estabilidade do processo bem como sobre a geometria dos cordões. As filmagens termográficas sugerem que a alimentação dinâmica influencia na termodinâmica da poça, aumentando as trocas convectivas com a peça e reduzindo os tempos de solidificação. Ademais, os resultados mostraram também que a inserção de topo, embora permita a execução procedimentos omnidirecionais (variação da trajetória da tocha), apresenta grande variação na geometria dos cordões para as diferentes posições de inserção. Além de corrente constante, o método proposto para sincronia entre corrente pulsada e alimentação dinâmica se mostrou eficaz e a técnica sincronizada no pulso apresentou melhores resultados voltados para revestimento do que a técnica de sincronismo na base. Por fim, aos experimentos de revestimentos duro mostraram que a alimentação dinâmica favorece a dispersão de carbonetos, aumentando a resistência à abrasão dos cordões. Em conclusão, este trabalho apresenta contribuições significativas para a compreensão e controle dos eventos relacionados a transferência metálica no processo TIG com alimentação dinâmica de arame com baixo ângulo de inserção, possibilitando novas frentes de aplicações.

Palavras-chave: Alimentação dinâmica de arame; Transferência metálica; Caracterização de processo; Automação da soldagem; Monitoramento e Controle de processo.

ABSTRACT

With the advancement of welding technologies, GTAW process variants such as TIPTIG and TOPTIG stand out for their promise of greater productivity and quality, incorporating innovations such as dynamic feeding and low-angle wire insertion. However, the scarcity of technical studies on their real effects highlights the need for further research. In this context, the present work aims to characterize the GTAW process combining both variants—dynamic feeding and top insertion—focusing on metal transfer events and the influence of process parameters on the macro and microstructural aspects of the weld beads. To achieve this, monitoring and control methods based on electrical signal acquisition, particularly the voltage between the filler metal and the electrode, were employed, along with high-speed filming and infrared thermography. The results emphasize the strong influence of dynamic wire feeding on process stability and bead geometry. Thermographic imaging suggests that dynamic feeding affects the thermodynamics of the weld pool, increasing convective exchanges with the workpiece and reducing solidification times. Additionally, the findings revealed that top insertion, while enabling omnidirectional procedures (torch trajectory variation), results in significant variations in bead geometry depending on the insertion position. Beyond constant current operation, the proposed method for synchronizing pulsed current with dynamic feeding proved effective, with pulse-synchronized techniques showing better results for coating applications compared to base-synchronized techniques. Finally, experiments on hardfacing demonstrated that dynamic feeding promotes the better dispersion of carbides, enhancing the abrasion resistance of the weld beads. In conclusion, this work provides significant contributions to understanding and controlling metal transfer events in the TIG process with dynamic wire feeding, paving the way for new application possibilities.

Keywords: Dynamic wire feeding; Metal transfer; Process characterization; Welding automation; Process monitoring and control.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - RELAÇÃO VELOCIDADE DE ARAME X POTÊNCIA.....	36
FIGURA 2 - OSCIOGRAMAS DE CORRENTE (VERMELHO) E VELOCIDADE DE ARAME (VERDE).....	37
FIGURA 3 – RUPTURA DA PONTE METÁLICA NO INÍCIO DO PERÍODO DE PULSO. PROCESSO TIG PULSADO COM ALIMENTAÇÃO CONVENCIONAL.	38
FIGURA 4 - REPRESENTAÇÃO DO MOVIMENTO OSCILATÓRIO DO ARAME.....	39
FIGURA 5 – A) MECANISMO DE OSCILAÇÃO TIPTIG. B) BLOCO DE ROLETES.....	40
FIGURA 6 – EXEMPLOS DE DIRECIONADORES DE ARAME PARA PROCESSOS AUTOMATIZADOS E MANUAIS. A) DIRECIONADOR DESENVOLVIDO PELO LABSOLDA – UFSC; B) FRONIUS DYNAMIC WIRE; C) EWM TIG SPEED; D) LINCOLN TOPTIG.	42
FIGURA 7 – PARÂMETROS DE DIRECIONAMENTO DO ARAME.....	43
FIGURA 8 – COMPARAÇÃO ENTRE ALIMENTAÇÃO PELA FRENTE (SUP.) E POR TRÁS (INF.) DO ARCO.	44
FIGURA 9 – CORDÕES DEPOSITADOS COM ÂNGULO DE ALIMENTAÇÃO DE 50 (A), 60 (B) E 70º (C).	44
FIGURA 10 – ESQ.) BOCAL TOPTIG; DIR.) REPRESENTAÇÃO DO PROCESSO TOPTIG: 1-ELETRODO; 2-DIRECIONADOR DE ARAME; 3-ARAME; 4-BOCAL; 5-GÁS DE PROTEÇÃO; 6-ARCO ELÉTRICO; 7-PEÇA.	45
FIGURA 11 – RELAÇÃO LINEAR ENTRE VELOCIDADE MÁXIMA DE ARAME E ALTURA DO ARCO PARA CORRENTE DE 220 A NO PROCESSO TOPTIG.	46
FIGURA 12 – COMPARAÇÃO ENTRE AS ACESSIBILIDADES DAS TOCHAS COM ALIMENTADORES CONVENCIONAIS (ESQ.) E O SISTEMA TOPTIG® (DIR.).....	47
FIGURA 13 – ASPECTO DOS CORDÕES E MACROGRAFIAS PARA AS DIFERENTES POSIÇÕES DE INSERÇÃO DO ARAME NO PROCESSO TOPTIG. I = 220 A, Vs = 30CM/MIN E VA = 2,4 M/MIN.	48
FIGURA 14 – SOBREPOSIÇÕES DE CORDÕES REALIZADOS PELO PROCESSO TIG CONVENCIONAL (ESQ.) E TOPTIG (DIR.).	49
FIGURA 15 – AMOSTRA DE SOBREPOSIÇÃO DE CAMADAS EM TRAJETÓRIA QUADRICULAR PELO PROCESSO TOPTIG.	49
FIGURA 16 – RESULTADOS DE AMOSTRAS REALIZADAS EM TRAJETÓRIA QUADRICULAR E CIRCULAR PARA PROCESSO TIG COM ÂNGULO DE ALIMENTAÇÃO DE 30º (ESQ.) E SEÇÕES MACROGRÁFICAS PARA O ENSAIO EM TRAJETÓRIA QUADRICULAR (DIR.).	50
FIGURA 17 – PROJETO DE TOCHA COM ELETRODO ROTATIVO E ALIMENTAÇÃO COAXIAL DE ARAME.	51
FIGURA 18 – DEPÓSITOS CIRCULARES COM TÉCNICA DE ELETRODO ROTACIONAL E ALIMENTAÇÃO CONVENCIONAL PARA DIFERENTES VELOCIDADES DE ARAME E DISTÂNCIA ELETRODO PEÇA.....	52

FIGURA 19 – CABEÇOTE DE TOCHA TIG OMNIDIRECIONAL. A) MODELO EM CAD; B) PROTÓTIPO.....	52
FIGURA 20 – COMPARAÇÃO DA VARIAÇÃO NA LARGURA E ALTURA DO CORDÃO PARA TIG CONVENCIONAL (SUP.) E OMNIDIRECIONAL (INF.).	53
FIGURA 21 – DISPERSÃO DE PRECIPITADOS PARA AS DIFERENTES CONDIÇÕES DE OSCILAÇÃO DO ARAME. DA ESQUERDA PARA A DIREITA: 0, 5 E 18 HZ.....	56
FIGURA 22 - MICROESTRUTURA DO CENTRO DAS PAREDES REALIZADAS COM O PROCESSO PLASMA E ALIMENTAÇÃO DINÂMICA DE ARAME DE INOX 309 L.	57
FIGURA 23 – VALORES DE MEDIÇÕES DE MICRODUREZA EM PAREDES FEITA POR MANUFATURA ADITIVA DE INOX 309 L PELO PROCESSO PLASMA.	58
FIGURA 24 – PERFIL DE MICRODUREZA DE ENSAIOS REALIZADO COM ALIMENTAÇÃO CONVENCIONAL E ALIMENTAÇÃO DINÂMICA DE ARAME EM JUNTAS DE AÇO ASTM A516-70.	58
FIGURA 25 - IMAGEM TERMOGRÁFICA PELO VERSO DA CHAPA: (A) PROCESSO AUTÓGENO; (B) PROCESSO COM ALIMENTAÇÃO CONTÍNUA; (C) PROCESSO COM ALIMENTAÇÃO DINÂMICA E FREQUÊNCIA DE 1 HZ; (D) PROCESSO COM ALIMENTAÇÃO DINÂMICA E FREQUÊNCIA 2 HZ.....	59
FIGURA 26 - PERFIL TÉRMICO DE TEMPERATURA PARA SOLDAGEM COM A) ALIMENTAÇÃO CONTÍNUA DE ARAME, E B) ALIMENTAÇÃO DINÂMICA DE ARAME.	60
FIGURA 27 - ESPECTRO TERMOGRÁFICO DA SUPERFÍCIE DA POÇA. A) ALIMENTAÇÃO CONTÍNUA; B) ALIMENTAÇÃO DINÂMICA.....	61
FIGURA 28 – MODOS DE TRANSFERÊNCIA METÁLICA NO PROCESSO TIG.	63
FIGURA 29 – TRANSFERÊNCIA METÁLICA EM FUNÇÃO DO ÂNGULO DE ALIMENTAÇÃO	63
FIGURA 30 – MODO DE TRANSFERÊNCIA METÁLICA PARA DIFERENTES RELAÇÕES DE APORTE TÉRMICO.	64
FIGURA 31 – VARIAÇÃO DA TENSÃO DO ARCO NO MOMENTO DE DESTACAMENTO DE GOTA NO PROCESSO TIG (ESQ.) E PLASMA (DIR.).	65
FIGURA 32 – OSCILOGRAMA DE TENSÃO DO ARCO E CORRENTE PARA PROCESSO TIG PULSADO COM ALIMENTAÇÃO PULSADA DE ARAME.....	65
FIGURA 33 – VARIAÇÃO DA FREQUÊNCIA DE DESTACAMENTO DE GOTA COM AUMENTO DA VA.....	66
FIGURA 34 – OSCILOGRAMAS DE MONITORAMENTO DOS PARÂMETROS ELÉTRICOS DO ARCO (CORRENTE E TENSÃO) E DA TENSÃO ARAME-ELETRODO.	67
FIGURA 35 – TRANSFERÊNCIA METÁLICA NO PROCESSO TIG COM CORRENTE PULSADA E ALIMENTAÇÃO DINÂMICA.....	68
FIGURA 36 – BANCADA DE ENSAIOS MOC. 1) UNIDADE DE REFRIGERAÇÃO DA BASE REFRIGERADA. 2) UNIDADE DE REFRIGERAÇÃO DA TOCHA E BOCAL. 3) FONTE DE SOLDAGEM. 4) CABEÇOTE ALIMENTADOR DE ARAME.	

5) SISTEMA CARTESIANO DE SOLDAGEM - SCS. 6) UNIDADE DE CONTROLE DO SCS. 7) MVS – MEDIDOR DE VARIÁVEIS DE SOLDAGEM. 8) MÓDULO DE OSCILAÇÃO DE CONDUÍTE – MOC. 9) UNIDADE DE CONTROLE DO MOC.	69
FIGURA 37 – BANCADA DE ENSAIOS MAD. 1) FONTE DE SOLDAGEM. 2) SCS. 3) UNIDADE DE CONTROLE SCS. 4) MÓDULO DE ALIMENTAÇÃO DINÂMICA – MAD. 5) UNIDADE DE CONTROLE DO MAD.	70
FIGURA 38 – A) SISTEMA CARTESIANO DE SOLDAGEM. B) DETALHE DA BASE REFRIGERADA.	71
FIGURA 39 – A) BOCAL PARA INSERÇÃO DE TOPO.	72
FIGURA 40 – CÂMERAS DE FILMAGEM EM ALTA VELOCIDADE. ESQ) IDT MOTIONPRO Y4-S2. DIR) PHOTRON FASTCAM NOVA S9.	73
FIGURA 41 – A) CÂMERA DSLR CANON 60D. B) LENTE CANON EF 180MM USM MACRO. C) CANON EF 2X III EXTENDER.	73
FIGURA 42 – EXEMPLO DE IMAGEM SEM ILUMINAÇÃO LASER (A), ILUMINAÇÃO COM LASER DESFOCADO (B) E ILUMINAÇÃO COM LASER EM FOCO	74
FIGURA 43 – EXEMPLO DE AMOSTRA DE AÇO INOXIDÁVEL 316 LSi DEPOSITADO EM AÇO CARBONO ATACADA COM REAGENTE NITAL 10%.	76
FIGURA 44 – ETAPAS DO ALGORITMO PARA ANÁLISE DE MACROS.	77
FIGURA 45 – A) MICROSCÓPIO ÓPTICO ZEISS AXIOLAB 5.	77
FIGURA 46 – ESQUEMÁTICO DE CORTE DAS AMOSTRAS PARA ENSAIOS METALOGRAFÍCOS.	77
FIGURA 47 – MICRODURÔMETRO BUEHLER WILSON VH1102	79
FIGURA 48 – POSIÇÃO DAS INDENTAÇÕES PARA TESTE DE MICRODUREZA. ESPAÇAMENTOS EM MILÍMETROS.	80
FIGURA 49 – INDENTAÇÕES PARA ENSAIOS DE MICRODUREZA NA SEÇÃO TRANSVERSAL EM AMOSTRAS DE REVESTIMENTO DURO.	80
FIGURA 50 - INDENTAÇÕES PARA ENSAIOS DE MICRODUREZA NA SUPERFÍCIE DO CORDÃO EM AMOSTRAS DE REVESTIMENTO DURO	81
FIGURA 51 - SENSOR DE VELOCIDADE DE ARAME. RAIO DO ROLETE (R): 11,2 MM.	82
FIGURA 52 – BANCADA PARA AFERIÇÃO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DA VELOCIDADE DE ARAME.	83
FIGURA 53 – MARCADOR PARA RASTREAMENTO DE PONTO NO ARAME.	84
FIGURA 54 – MARCADOR PARA RASTREAMENTO DE PONTO NO ROLETE DO <i>ENCODER</i>	84
FIGURA 55 – MAD – MÓDULO DE ALIMENTAÇÃO DINÂMICA.	86
FIGURA 56 – MOC – MÓDULO DE OSCILAÇÃO DO CONDUÍTE (DETALHES).	86
FIGURA 57 - MOC – MÓDULO DE OSCILAÇÃO DE CONDUÍTE MONTADO.	87

FIGURA 58 – BANCADA DE ENSAIOS PARA AVALIAÇÃO DO MAD. 1 – MAD. 2 – CONTROLADOR DO MAD. 3 – SAIDA DO ARAME NA TOCHA. 4 – CÂMERA DE ALTA VELOCIDADE.....	88
FIGURA 59 - VARIAÇÃO DO SINAL DE TENSÃO ARAME-ELETRODO DE ACORDO COM A POSIÇÃO DO METAL DE ADIÇÃO NO ARCO ELÉTRICO. IMAGENS REALIZADAS COM FILTRO ÓTICO PASSA-BANDA DE 470NM.	90
FIGURA 60 - OSCILOGRAMA DOS SINAIS DE TENSÃO E CORRENTE CARACTERÍSTICOS DO PROCESSO TIG COM ALIMENTAÇÃO DINÂMICA DE ARAME.	92
FIGURA 61 – OSCILOGRAMA DOS TENSÃO ARAME-ELETRODO (U_{AE}) E VELOCIDADE DE ARAME PARA PROCESSO TIG COM ALIMENTAÇÃO DINÂMICA DE ARAME.....	93
FIGURA 62 – REPRESENTAÇÃO DAS VARIÁVEIS CALCULADAS NOS OSCILOGRAMAS DE I_{ARC} , U_{ARC} E U_{AE}	96
FIGURA 63 – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DAS VELOCIDADES CALCULADAS: VA_{MED} , VA_A , VA_R , VA_{MAX_A} E VA_{MAX_R}	98
FIGURA 64 – REPRESENTAÇÃO GRÁFICAS DOS PARÂMETROS M , AL , T_P E T_D	100
FIGURA 65 - PARÂMETROS DE POSICIONAMENTO DO ARAME E DA TOCHA DE SOLDAGEM.	101
FIGURA 66 – DETERMINAÇÃO DA AMPLITUDE DE OSCILAÇÃO DO ARAME.	102
FIGURA 67 – POSIÇÃO DE ALIMENTAÇÃO DE ARAME: TRASEIRA, FRONTAL E LATERAL.....	106
FIGURA 68 – ÁREAS PARA CÁLCULO DE ÍNDICES DE SIMETRIA	107
FIGURA 69 – ESQUEMÁTICO DE DESLOCAMENTO DE TOCHA E VARIAÇÃO DA POSIÇÃO DE INSERÇÃO PARA EXPERIMENTO CIRCUNFERENCIAL.....	108
FIGURA 70 – VARIAÇÃO DA DEA PELO COMPRIMENTO DO <i>STICKOUT</i> DO ELETRODO.....	109
FIGURA 71 – ESQUEMÁTICO DE ENSAIO PARA MEDIÇÃO DE TEMPERATURA POR CÂMERA TERMOGRÁFICA E DETALHE DA INTERFACE DO SOFTWARE.	110
FIGURA 72 – CÂMERA TERMOGRÁFICA FLIR T1030SC	111
FIGURA 73 – FLUXOGRAMA DA LÓGICA DE SINCRONIA ENTRE CORRENTE PULSADA E ALIMENTAÇÃO DINÂMICA.....	113
FIGURA 74 – ESQUEMÁTICO DOS PARÂMETROS DE INSERÇÃO DO ARAME PARA ENSAIO DE REVESTIMENTO DURO.	115
FIGURA 75 – ESQUEMÁTICO DE TESTE DE ABRASÃO ASTM G65.	116
FIGURA 76 – VARIAÇÃO DA AMPLITUDE DE OSCILAÇÃO COM A FREQUÊNCIA. AMPLITUDES REGULADAS EM 5,0, 7,5 E 10,0 MM.	118
FIGURA 77 – PERCENTUAL DE VARIAÇÃO DA AMPLITUDE COM AUMENTO DA FREQUÊNCIA.....	119
FIGURA 78 – VARIAÇÃO DA AMPLITUDE COM A FREQUÊNCIAS DE OSCILAÇÃO. FRAMES NOS LIMITES DA AMPLITUDE SOBREPOSTOS.	120

FIGURA 79 – AFERIÇÃO DA AMPLITUDE POR MEIO DO RECURSO SUPER <i>SLOW-MOTION</i> (240 FPS). LIMITES DE AVANÇO E RECUO.	121
FIGURA 80 – AMPLITUDES MÉDIAS OBTIDAS VIA AQUISIÇÃO DE SINAIS PARA AS FREQUÊNCIAS DE 3 À 15 Hz.	122
FIGURA 81 – DISPOSIÇÃO DA BANCADA. A) POSIÇÃO DO <i>ENCODER</i> ; B) CURVATURA DO CONDUÍTE APÓS O <i>ENCODER</i>	122
FIGURA 82 – GRÁFICOS DAS VELOCIDADES MEDIDAS VIA FILMAGEM EM ALTA VELOCIDADE E AQUISIÇÃO DE DADOS. FREQUÊNCIA E AMPLITUDE DE OSCILAÇÃO DE ARAME EM 6Hz E 5 MM RESPECTIVAMENTE.	124
FIGURA 83 – GRÁFICOS DAS VELOCIDADES FILTRADAS SOBREPOSTAS. FREQUÊNCIA E AMPLITUDE DE OSCILAÇÃO DE ARAME EM 6Hz E 5 MM RESPECTIVAMENTE.	125
FIGURA 84 - GRÁFICOS DAS VELOCIDADES PÓS-PROCESSADAS SOBREPOSTAS. FREQUÊNCIA E AMPLITUDE DE OSCILAÇÃO DE ARAME EM 6Hz E 5 MM RESPECTIVAMENTE.	126
FIGURA 85 – ESQUEMÁTICO DA FOLGA ENTRE AS PAREDES DO CONDUÍTE E O ARAME.	127
FIGURA 86 - CONFIGURAÇÃO DE CONDUÍTE AVALIADAS. A) LIVRE. B) ACOPLADOR. C) ACOPLADOR + CURVATURA.	131
FIGURA 87 – ACOPLAMENTO CONDUÍTE-ARAME. A) SEM ACOPLADOR. B) COM ACOPLADOR.	131
FIGURA 88 - DISPOSIÇÃO DO <i>ENCODER</i> E DO MOC NA BANCADA DE ENSAIOS.	132
FIGURA 89 – COMPONENTES DA VELOCIDADE DE ARAME. (ESQ.) V_A OSCILATÓRIO E V_A CONSTANTE DISCRIMINADAS. (DIR.) V_A RESULTANTE.	134
FIGURA 90 – COMPONENTE OSCILATÓRIA DA V_A . VARIAÇÃO COM A FREQUÊNCIA DE OSCILAÇÃO.	135
FIGURA 91 - COMPONENTE OSCILATÓRIA DA V_A . VARIAÇÃO COM A AMPLITUDE DE OSCILAÇÃO.	135
FIGURA 92 – RELAÇÃO DE VELOCIDADE MÉDIA DE RECUO E FREQUÊNCIA DE OSCILAÇÃO DO ARAME.	136
FIGURA 93 - OSCILOGRAMAS DE U_{ARC} , U_{AE} E CORRENTE PARA DIFERENTES VELOCIDADES DE ALIMENTAÇÃO DE ARAME.	137
FIGURA 94 – OSCILOGRAMAS DE U_{AE} E V_A (0,45 M/MIN) E FRAMES OBTIDOS POR FILMAGEM EM ALTA VELOCIDADE PARA PROCEDIMENTO COM ALIMENTAÇÃO DINÂMICA (ESQ.) E CONVENCIONAL (DIR.).	138
FIGURA 95 – OSCILOGRAMAS DE U_{AE} E V_A EM CONDIÇÃO DE <i>STUBBING</i> PARA AD (ESQ.) E AC (DIR.).	140
FIGURA 96 -RESPINGOS DE METAL LÍQUIDO CAUSADOS PELO <i>STUBBING</i>	141
FIGURA 97 - TENSÕES DO ARCO MÉDIA (U_{ARC}), EM PONTE (U_{PT}) E DESTACADA (U_{DEST}) PARA SÉRIE SE ENSAIOS VARIANDO A FREQUÊNCIA DE OSCILAÇÃO DO ARAME.	143
FIGURA 98 – POTÊNCIA MÉDIA (P_{ARC}), POTÊNCIA EM PONTE (P_{PT}) E POTÊNCIA EM PONTE DESTACADA (P_{DEST}) PARA A SÉRIE VARIANDO A FREQUÊNCIA DE OSCILAÇÃO DO ARAME.	144

FIGURA 99 – ESQ.) TEMPOS EM PONTE E PONTE DESTACADA. DIR.) PERCENTUAL DO PERÍODO PARA AS CONDIÇÕES EM PONTE E DESTACADO. VALORES REFERENTE À SÉRIE DE ENSAIOS VARIANDO A FREQUÊNCIA.	145
FIGURA 100 – OSCILOGRAMA E FRAMES DE FILMAGEM PARA ENSAIOS COM AC EM PONTE INTERMITENTE.	146
FIGURA 101 – COMPARATIVO ENTRE TRANSFERÊNCIA EM GOTA (A) E TRANSFERÊNCIA EM PONTE INTERMITENTE (B).....	147
FIGURA 102 – OSCILOGRAMA DE TENSÃO E CORRENTE PARA CONDIÇÃO AD 9 Hz.....	148
FIGURA 103 – VELOCIDADES MÉDIAS E MÁXIMAS DE AVANÇO E RECUO PARA A SÉRIE VARIANDO A FREQUÊNCIA - MAD.	149
FIGURA 104 – AMPLITUDE DE AVANÇO, RECUO E AFASTAMENTO MÁXIMO PARA A SÉRIE VARIANDO FREQUÊNCIA DE OSCILAÇÃO DO ARAME.	150
FIGURA 105 – POSIÇÃO DE MÁXIMO RECUO DO ARAME PARA SÉRIE DE ENSAIOS VARIANDO A FREQUÊNCIA DE OSCILAÇÃO DO ARAME.	151
FIGURA 106 – AMPLITUDE DE RECUO (A_R) E AFASTAMENTO MÁXIMO (AF) PARA O ENSAIO COM AD 9 Hz. ..	151
FIGURA 107 – ALONGAMENTO DA POÇA POR TENSÃO SUPERFICIAL.	152
FIGURA 108 – OSCILOGRAMAS DE TENSÃO E VELOCIDADE DO ARAME PARA O ENSAIO AD 3Hz.....	154
FIGURA 109 – OSCILOGRAMAS DE TENSÃO E VELOCIDADE DO ARAME PARA O ENSAIO AD 12 Hz.	155
FIGURA 110 – MERGULHO DO ARAME (M), VOLUME TRANSFERIDO (V_T) E RECUO EM PONTE (R_P).....	156
FIGURA 111 – GRÁFICOS DA VARIAÇÃO GEOMÉTRICA DOS CORDÕES PARA A SÉRIE VARIANDO FREQUÊNCIA DE OSCILAÇÃO.	158
FIGURA 112 – MACROGRAFIAS DOS CORDÕES DA SÉRIE DE ENSAIOS VARIANDO FREQUÊNCIA. AMOSTRAS DO CENTRO DO CORDÃO (CORTE BB DA FIGURA 46). LINHAS TRACEJADAS REPRESENTAM AS DIMENSÕES DA AMOSTRA AC EM PONTE CONTÍNUA.	159
FIGURA 113 – COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO DE SPEARMAN DA FREQUÊNCIA COM VALORES GEOMÉTRICOS DOS CORDÕES DA SÉRIE DE ENSAIOS VARIANDO A FREQUÊNCIA DE OSCILAÇÃO.....	161
FIGURA 114 – MICRODUREZA VICKERS HV1 PARA ENSAIOS VARIANDO FREQUÊNCIA DE OSCILAÇÃO DO ARAME.	162
FIGURA 115 – MICROESTRUTURA DO METAL DE SOLDA NA REGIÃO CENTRAL PARA OS ENSAIOS EM AC EM PONTE CONTÍNUA, E AD EM 3, 9 E 15 Hz.	163
FIGURA 116 - TENSÕES DO ARCO MÉDIA (U_{ARC}), EM PONTE (U_P) E DESTACADA (U_D) PARA SÉRIE SE ENSAIOS VARIANDO A AMPLITUDE DE OSCILAÇÃO DO ARAME NAS FREQUÊNCIAS DE 6 E 9 Hz.	165

FIGURA 117 - TEMPOS EM PONTE E PONTE DESTACADA, E PERCENTUAL DO PERÍODO PARA AS CONDIÇÕES EM PONTE E DESTACADO. VALORES REFERENTE À SÉRIE DE ENSAIOS VARIANDO A AMPLITUDE DE OSCILAÇÃO NAS FREQUÊNCIAS DE 6 (ESQ.) E 9 Hz (DIR.).	167
FIGURA 118 - AMPLITUDE DE AVANÇO, RECUO E AFASTAMENTO MÁXIMO PARA A SÉRIE VARIANDO A AMPLITUDE DE OSCILAÇÃO DO ARAME NAS FREQUÊNCIAS DE 6 Hz (ESQ.) E 9 H (DIR.).	168
FIGURA 119 - VELOCIDADES MÉDIAS E MÁXIMAS DE AVANÇO E RECUO PARA A SÉRIE VARIANDO A AMPLITUDE DE OSCILAÇÃO NAS FREQUÊNCIAS DE 6 Hz (ESQ.) E 9 Hz (DIR.).	168
FIGURA 120 – MERGULHO DO ARAME (M), VOLUME TRANSFERIDO (V _T) E RECUO EM PONTE (R _P) PARA A SÉRIE VARIANDO A AMPLITUDE DE OSCILAÇÃO NAS FREQUÊNCIAS DE 6 Hz (ESQ.) E 9 Hz (DIR.).	169
FIGURA 121 – OSCILOGRAMA DE CORRENTE (I), TENSÃO DO ARCO (U _{ARC}) E TENSÃO ARAME-ELETRODO (U _{AE}) PARA AS AMPLITUDES DE OSCILAÇÃO DO ARAME DE 3, 5 E 10 MM NA FREQUÊNCIA DE 9 Hz.	170
FIGURA 122 – OSCILOGRAMA DE TENSÃO E VA PARA ENSAIO À 9 Hz COM AMPLITUDE DE 10 MM.	171
FIGURA 123 – TENSÃO ARAME-ELETRODO PARA A SÉRIE VARIANDO A AMPLITUDE DE OSCILAÇÃO NAS FREQUÊNCIAS DE 6 Hz (ESQ.) E 9 Hz (DIR.).	172
FIGURA 124 - GRÁFICOS DA VARIAÇÃO GEOMÉTRICA DOS CORDÕES PARA A SÉRIE VARIANDO AMPLITUDE DE OSCILAÇÃO NAS FREQUÊNCIAS DE 6 E 9 Hz.	173
FIGURA 125 - MACROGRAFIAS DOS CORDÕES DA SÉRIE DE ENSAIOS VARIANDO AMPLITUDE DE OSCILAÇÃO PARA AS FREQUÊNCIAS DE 6 Hz (SUPERIOR) E 9 Hz (INFERIOR). AMOSTRAS DO CENTRO DO CORDÃO (CORTE BB DA FIGURA 46). LINHAS TRACEJADAS REPRESENTAM AS DIMENSÕES DOS ENSAIOS EM 3 MM.	174
FIGURA 126 - COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO DE SPEARMAN DA FREQUÊNCIA COM VALORES GEOMÉTRICOS DOS CORDÕES DA SÉRIE DE ENSAIOS VARIANDO A AMPLITUDE DE OSCILAÇÃO NAS FREQUÊNCIAS DE 6Hz (SUP.) E 9 Hz(INF.).	175
FIGURA 127 – OSCILOGRAMAS DE TENSÃO E VA PARA DIFERENTES CONDIÇÕES DE DEA.	176
FIGURA 128 – VARIAÇÃO DOS SINAIS DE TENSÃO DO ARCO (ESQ.) E TENSÃO ARAME-ELETRODO, (DIR.) PARA OS ENSAIOS REALIZADOS COM DIFERENTES DEA.	178
FIGURA 129 – POSIÇÃO DO ARAME NO PONTO DE MÁXIMO RECUO PARA DIFERENTES DEAs.	178
FIGURA 130 - AMPLITUDE DE AVANÇO / RECUO E AFASTAMENTO MÁXIMO (ESQ.) E. MERGULHO DO ARAME, RECUO E PONTE E VOLUME TRANSFERIDO (DIR.) PARA OS ENSAIOS REALIZADOS COM DIFERENTES DEA.	179
FIGURA 131 - TEMPOS EM PONTE E PONTE DESTACADA (ESQ.) E, PERCENTUAL DO PERÍODO (DIR.) PARA DIFERENTES DEA.	180
FIGURA 132 - TEMPOS EM PONTE E PONTE DESTACADA (ESQ.) E PERCENTUAL DO PERÍODO (DIR.) PARA OS ENSAIOS REALIZADOS EM DIFERENTES NÍVEIS DE CORRENTE DE SOLDAGEM.	183

FIGURA 133 – VELOCIDADES MÉDIAS (ESQ.) E MÁXIMAS (DIR.) DE AVANÇO E RECUO DO ARAME PARA OS ENSAIOS REALIZADOS EM DIFERENTES NÍVEIS DE CORRENTE DE SOLDAGEM.	184
FIGURA 134 - AMPLITUDE DE AVANÇO / RECUO E AFASTAMENTO MÁXIMO (ESQ.) E. MERGULHO DO ARAME, RECUO E PONTE E VOLUME TRANSFERIDO (DIR.) PARA OS ENSAIOS REALIZADOS EM DIFERENTES NÍVEIS DE CORRENTE DE SOLDAGEM.	185
FIGURA 135 – OSCILOGRAMAS DE TENSÃO E VA PARA OS ENSAIOS REALIZADOS EM 110, 180 E 250 A.....	186
FIGURA 136 - GRÁFICOS DA VARIAÇÃO GEOMÉTRICA DOS CORDÕES PARA A SÉRIE COM CORRENTE DE 110, 180 E 250 A.	188
FIGURA 137 - MACROGRAFIAS DOS CORDÕES DA SÉRIE DE ENSAIOS EM 110, 180 E 250 A. AMOSTRAS DO CENTRO DO CORDÃO (CORTE BB DA FIGURA 46). LINHAS TRACEJADAS REPRESENTAM AS DIMENSÕES DOS ENSAIOS EM 3 MM	189
FIGURA 138 - COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO DE PEARSON PARA FREQUÊNCIA COM VALORES GEOMÉTRICOS DOS CORDÕES DA SÉRIE DE ENSAIOS COM CORRENTES DE 110, 180 E 250 A;.....	191
FIGURA 139 – TERMOGRAFIA PARA ENSAIOS COM INSERÇÃO DE TOPO EM 115 A (ESQ.) E 190 A (DIR.) VARIANDO A FREQUÊNCIA DE OSCILAÇÃO DO ARAME.	194
FIGURA 140 – TERMOGRAFIA PARA INSERÇÃO DE TOPO EM 190 A VARIANDO A FREQUÊNCIA DE OSCILAÇÃO DO ARAME.....	196
FIGURA 141 - GRÁFICOS DA VARIAÇÃO GEOMÉTRICA DOS CORDÕES PARA A SÉRIE VARIANDO A POSIÇÃO RELATIVA DE ALIMENTAÇÃO NAS FREQUÊNCIAS DE 0 (PT-CT), 6, 9 E 12 Hz.	199
FIGURA 142 - MACROGRAFIAS DOS CORDÕES DA SÉRIE DE ENSAIOS VARIANDO A POSIÇÃO DE INSERÇÃO DO ARAME. AMOSTRAS DO CENTRO DO CORDÃO (CORTE BB DA FIGURA 46).....	201
FIGURA 143 – VARIAÇÃO DO MERGULHO DO ARAME, RECUO E PONTE E VOLUME TRANSFERIDO (ESQ.) E AMPLITUDE DE AVANÇO / RECUO E AFASTAMENTO MÁXIMO (DIR.) PARA OS ENSAIOS REALIZADOS EM DIFERENTES POSIÇÕES DE ALIMENTAÇÃO.	201
FIGURA 144 – ASPECTO DOS CORDÕES DE SOLDA CIRCULARES COM ALIMENTAÇÃO OMNIDIRECIONAL.....	204
FIGURA 145 – VALORES MÉDIOS DE ALTURA E LARGURA DO CORDÃO NAS DIFERENTES REGIÕES DO CORDÃO. T = TRÁS; F=FRENTE; LE = LATERAL ESQUERDA; LD=LATERAL DIREITA.	205
FIGURA 146 – OSCILOGRAMA DE TENSÃO E CORRENTE COM FRAMES DE FILMAGEM PARA ENSAIOS COM AD E CORRENTE SINCRONIZADOS NO PULSO (ESQ.) E BASE (DIR.).....	207
FIGURA 147 – TEMPOS EM PONTE E DESTACADO E PERCENTUAIS DO PERÍODO PARA OS ENSAIOS SINCRONIZADOS NO PULSO (S-PULSO) E NA BASE (S-BASE).....	208

FIGURA 148 – TENSÃO DO ARCO E TENSÃO ARAME-ELETRODO PARA OS ENSAIOS SINCRONIZADOS NO PULSO (S-PULSO) E NA BASE (S-BASE).....	210
FIGURA 149 - AMPLITUDE DE AVANÇO / RECUO E AFASTAMENTO MÁXIMO (ESQ.) E. MERGULHO DO ARAME, RECUO E PONTE E VOLUME TRANSFERIDO (DIR.) PARA ENSAIOS SINCRONIZADOS NO PULSO E NA BASE. ...	211
FIGURA 150 – OSCILOGRAMAS DE TENSÃO E VELOCIDADE DE ARAME PARA ENSAIOS SINCRONIZADOS REALIZADOS COM 1 HZ. S-PULSO (ESQ.) E S-BASE (DIR.)	212
FIGURA 151 – DETALHE DA TRANSFERÊNCIA DA GOTA FORMADA NA PONTA DO ARAME ANTES DO ESTABELECIMENTO DA PONTE METÁLICA NA CONDIÇÃO DE S-PULSO (ESQ.) E S-BASE (DIR.). FREQUÊNCIA DE OSCILAÇÃO EM 1 HZ.	213
FIGURA 152 – AUMENTO DO AFASTAMENTO DO ARAME DEVIDO A FORMAÇÃO DA GOTA. CONDIÇÃO S-BASE EM 1 HZ.	214
FIGURA 153 – EFEITO DE CONTRAÇÃO E DILATAÇÃO DA POÇA PARA SINCRONIA NO PULSO (ESQ.) E NA BASE (DIR.).	215
FIGURA 154 – MACROGRAFIAS RELATIVA AOS ENSAIOS COM ALIMENTAÇÃO DINÂMICA SINCRONIZADA NA CORRENTE DE BASE.....	216
FIGURA 155 - MACROGRAFIAS RELATIVA AOS ENSAIOS COM ALIMENTAÇÃO DINÂMICA SINCRONIZADA NA CORRENTE DE PULSO.....	216
FIGURA 156 - MACROGRAFIAS DOS ENSAIOS COM ALIMENTAÇÃO DINÂMICA EM CORRENTE MÉDIA (I-MED REFERENTE À S-PULSO).....	217
FIGURA 157 - GRÁFICOS DA VARIAÇÃO GEOMÉTRICA DOS CORDÕES PARA A SÉRIE DE ENSAIOS COM CORRENTE PULSADA SINCRONIZADA.....	218
FIGURA 158 – OSCILOGRAMA PARA ENSAIOS EM CORRENTE PULSADA EM 1 HZ E AC.....	221
FIGURA 159 – OSCILOGRAMAS DE TENSÃO E CORRENTE PARA CORRENTE PULSADA EM 1 HZ E FREQUÊNCIA DE OSCILAÇÃO DO ARAME EM 5 HZ (ESQ.) E 10 HZ (DIR.).	222
FIGURA 160 – (ESQ.) SEÇÕES TRANSVERSAIS DOS DEPÓSITOS SOBRE CHAPA. (DIR.) MEDIÇÕES DA GEOMETRIA DOS CORDÕES.	225
FIGURA 161 – INDENTAÇÕES DO TESTE DE MICRODUREZA VICKERS.....	226
FIGURA 162 – DISPERSÃO DOS CARBETOS DE TUNGSTÊNIO.	228

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO ARAME DE 316LSI – 1,0 MM.....	75
TABELA 2 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO ARAME CORODUR AO-BR DE 1,6 MM.	75
TABELA 3 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA DAS CHAPAS DE AÇO CARBONO ASTM A36.....	76
TABELA 4 – MATRIZ DE ENSAIOS PARA AVALIAÇÃO DO MAD.....	88
TABELA 5 – PARÂMETROS UTILIZADOS PARA A CARACTERIZAÇÃO DO PROCESSO TIG AD.	94
TABELA 6 – LIMITES DE VELOCIDADE DE ARAME PARA ALIMENTAÇÃO DINÂMICA (AD) E CONVENCIONAL (AC).	102
TABELA 7 – PARÂMETROS DE SOLDAGEM DA SÉRIE VARIANDO A FREQUÊNCIA DE OSCILAÇÃO DO ARAME.	103
TABELA 8 - PARÂMETROS DE SOLDAGEM DA SÉRIE VARIANDO A AMPLITUDE DE OSCILAÇÃO DO ARAME.....	104
TABELA 9 – VA CALCULADA PARA CORRENTES DE 110 A E 250 A.	105
TABELA 10 - PARÂMETROS DE SOLDAGEM PARA SERIE COM DIFERENTES NÍVEIS DE CORRENTE DE SOLDAGEM.	105
TABELA 11 – PARÂMETROS DE SOLDAGEM PARA A SÉRIE VARIANDO A POSIÇÃO DE ALIMENTAÇÃO DO ARAME.	106
TABELA 12 - PARÂMETROS DE SOLDAGEM DA SÉRIE VARIANDO A DISTÂNCIA ELETRODO-ARAME.....	109
TABELA 13 – PARÂMETROS DE SOLDAGEM PARA ENSAIOS DE MEDIÇÃO DA TEMPERATURA.	111
TABELA 14 – PARÂMETROS UTILIZADOS PARA ENSAIOS COM SINCRONIA NO PULSO E NA BASE.....	114
TABELA 15 – VALORES DE CORRENTE MÉDIA DOS ENSAIOS COM SINCRONIA NO PULSO PARA AS FREQUÊNCIAS DE 3, 6 E 9 HZ.....	114
TABELA 16 – PARÂMETROS DE SOLDAGEM PARA ENSAIOS DE REVESTIMENTO DURO.	116
TABELA 17 –FOLGA ENTRE ARAME E CONDUÍTE AVALIADA PELOS SINAIS DO MVS E LEITURA NA PONTA DO ARAME.....	127
TABELA 18 – VELOCIDADES MÉDIAS E DE PICO DE AVANÇO E RECUO PARA SINAIS AQUISITADOS VIA MVS E FILMAGENS EM <i>TRACKING POINT</i>	128
TABELA 19 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA) ENTRE AS MÉDIAS DAS VELOCIDADES DE AVANÇO E RECUO AQUISITADAS PELO MVS E PELA FILMAGEM DA PONTA DO ARAME. FREQUÊNCIA DE OSCILAÇÃO DO ARAME: 6 Hz.	129
TABELA 20 - ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA) ENTRE AS MÉDIAS DAS VELOCIDADES DE AVANÇO E RECUO AQUISITADAS PELO MVS E TP ARAME. FREQUÊNCIA DE OSCILAÇÃO DO ARAME: 9 E 12 Hz.	130
TABELA 21 – VARIAÇÃO DA AMPLITUDE PARA DIFERENTES CONDIÇÕES DE CONDUÍTE E FREQUÊNCIAS. AMPLITUDE NOMINAL DO DISCO EXCÊNTRICO: A = 5MM.....	132

TABELA 22 – VALORES MÉDIOS DE CORRENTE (I_{ARC}), TENSÃO DO ARCO (U_{ARC}), POTÊNCIA (P_{ARC}) E VELOCIDADE DO ARAME (VA_{MED}) PARA A SÉRIE DE ENSAIOS VARIANDO FREQUÊNCIA DE OSCILAÇÃO DO ARAME.	142
TABELA 23 - TENSÕES DO ARCO PARA SÉRIE SE ENSAIOS VARIANDO A FREQUENCIA E OSCILAÇÃO DO ARAME... ..	143
TABELA 24 - POTÊNCIAS PARA SÉRIE SE ENSAIOS VARIANDO A FREQUENCIA E OSCILAÇÃO DO ARAME.....	144
TABELA 25 – VALORES GEOMÉTRICOS DOS CORDÕES DE SOLDA PARA A SÉRIE VARIANDO FREQUÊNCIA DE OSCILAÇÃO.	159
TABELA 26 – VALORES DE <i>P-VALUE</i> REFERENTES AO MÉTODO ANOVA APLICADO SOBRE OS RESULTADOS GEOMÉTRICOS DA SÉRIE VARIANDO FREQUÊNCIA.	160
TABELA 27 – MICRODUREZA PARA ENSAIOS VARIANDO A FREQUÊNCIA DE OSCILAÇÃO DO ARAME.	162
TABELA 28 – VALORES <i>P</i> DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA) PARA OS RESULTADOS DE MICRODUREZA.	163
TABELA 29 – VALORES MÉDIOS DE CORRENTE (I_{ARC}), TENSÃO MÉDIA (U_{ARC}), POTÊNCIA MÉDIA (P_{ARC}) E VELOCIDADE DO ARAME MÉDIA (VA_{MED}) PARA A SÉRIE DE ENSAIOS VARIANDO A AMPLITUDE DE OSCILAÇÃO DO ARAME.....	165
TABELA 30 - TENSÕES DO ARCO PARA SÉRIE SE ENSAIOS VARIANDO A AMPLITUDE DE OSCILAÇÃO DO ARAME. .	166
TABELA 31 - VALORES MÉDIOS DAS GEOMETRIAS DOS CORDÕES DE SOLDA PARA A SÉRIE VARIANDO AMPLITUDE DE OSCILAÇÃO.	173
TABELA 32 - VALORES DE <i>P-VALUE</i> REFERENTES AO MÉTODO ANOVA APLICADO SOBRE OS RESULTADOS GEOMÉTRICOS DA SÉRIE VARIANDO A AMPLITUDE DE OSCILAÇÃO NAS FREQUÊNCIAS DE 6 E 9 Hz.	174
TABELA 33 – VALORES MÉDIOS DOS SINAIS ELÉTRICOS AQUISITADOS PARA A SÉRIE DE ENSAIOS VARIANDO A DEA	177
TABELA 34 - VALORES MÉDIOS DE CORRENTE (I_{ARC}), TENSÃO MÉDIA (U_{ARC}), POTÊNCIA MÉDIA (P_{ARC}) E VELOCIDADE DO ARAME MÉDIA (VA_{MED}) PARA OS ENSAIOS REALIZADOS EM DIFERENTES NÍVEIS DE CORRENTE E FREQUÊNCIA DE OSCILAÇÃO.....	181
TABELA 35 - TENSÕES DO ARCO PARA SÉRIE SE ENSAIOS DE ENSAIOS COM DIFERENTES NÍVEIS DE CORRENTE DE SOLDAGEM.	182
TABELA 36 - VALORES GEOMÉTRICOS DOS CORDÕES DE SOLDA PARA A SÉRIE COM CORRENTES DE 110, 180 E 250 A.	188
TABELA 37 – VALORES DE <i>P-VALUE</i> REFERENTES AO MÉTODO ANOVA APLICADO SOBRE OS RESULTADOS GEOMÉTRICOS DA SÉRIE COM CORRENTES DE 110, 180 E 250 A CONSIDERANDO APENA A ALIMENTAÇÃO DINÂMICA.....	190
TABELA 38 - VALORES MÉDIOS DE CORRENTE (I_{ARC}), TENSÃO MÉDIA (U_{ARC}) E POTÊNCIA MÉDIA (P_{ARC}) PARA ENSAIOS COM CORRENTE DE 190 A	192

TABELA 39 – VALORES MÉDIOS DE CORRENTE, TENSÃO DO ARCO, POTÊNCIA E VELOCIDADE DE ARAME PARA OS ENSAIOS VARIANDO A POSIÇÃO DE INSERÇÃO DO ARAME. F=FRONTAL; L=LATERAL E T=TRASEIRA.	198
TABELA 40 – VALORES GEOMÉTRICOS MEDIDOS PARA OS ENSAIOS REALIZADOS EM DIFERENTES POSIÇÕES DE INSERÇÃO DO ARAME.....	199
TABELA 41 – VALORES DE <i>P-VALUE</i> REFERENTES AO MÉTODO ANOVA APLICADO SOBRE OS RESULTADOS GEOMÉTRICOS DA SÉRIE VARIANDO A POSIÇÃO DE INSERÇÃO DO ARAME.....	202
TABELA 42 – ÍNDICES DE SIMETRIA DE ÁREA FUNDIDA E ÁREA PENETRADA	202
TABELA 43 – VALORES MÉDIOS DE CORRENTE, TENSÃO E POTÊNCIA DO ARCO PARA A SÉRIES SINCRONIZADAS NO PULSO E NA BASE.....	209
TABELA 44 – VALORES DE POTÊNCIA MÉDIA PARA SERIE S-BASE, S-PULSO E I-MED	216
TABELA 45 – VALORES MÉDIOS DAS GEOMETRIAS DOS CORDÕES DE SOLDA PARA A SÉRIE COM CORRENTE PULSADA SINCRONIZADA.....	217
TABELA 46 - VALORES DE <i>P-VALUE</i> REFERENTES AO MÉTODO ANOVA APLICADO SOBRE OS RESULTADOS GEOMÉTRICOS DA SÉRIE DE CORRENTE PULSADA SINCRONIZADA COM AD.....	220
TABELA 47 – VALORES GEOMÉTRICOS DOS CORDÕES TIPO <i>BEAD ON PLATE</i> PARA ENSAIOS DE REVESTIMENTO DURO.	225
TABELA 48 – MEDIÇÃO DE MICRODUREZA NAS SUPERFÍCIES DOS CORDÕES DE REVESTIMENTO DURO.....	227
TABELA 49 – VALORES DE MICRODUREZA MEDIDOS SOBRE AS PARTÍCULAS DE CARBETOS.	227
TABELA 50 – ÁREA COBERTA PELOS CARBETO DE TUNGSTÊNIO POR QUADRANTE.	229
TABELA 51 – PERDA DE MASSA NO TESTE DE ABRASÃO.....	230

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Δ_{PUL} – Delta Pulso
 A_{AV} – Amplitude de Avanço
 A_R – Amplitude de Recuo
AC – Alimentação Convencional
AD – Alimentação Dinâmica
AF – Afastamento Máximo
AL – Alongamento da Poça
 A_m – Angulo de molhamento
CAD – *Computer-Aided Design*
CCD - *Charge Coupled Device*
 C_{ENC} – Constante do *Encoder*
CSV – *Comma-Separated Values*
D - Diluição
DSLR - *Digital Single Lens Reflex*
Fps – *Frames Per Second*
GF – Grãos Finos
GG – Grãos Grosseiros
GTAW – *Gas Tungsten Arc Welding*
HRC – *Hardness Rocwell C*
HV – *Hardness Vickers*
 I_{ARC} – Corrente do Arco
 I_{HW} – Corrente do Arame Quente (*Hot-Wire*)
 I_{inst} – Corrente Instantânea do Arco
 IS_{AF} – Índice de Simetria de Área Fundida
 IS_{AP} – Índice de Simetria de Área Penetrada
L – Largura do cordão
M – Mergulho do Arame
MAD – Módulo de Alimentação Dinâmica
MB – Metal de Base
MEV – Microscópio Eletrônico de Varredura
MOC – Módulo Oscilador de Conduíte
MS – Metal de solda

MVS – Medidor de Variáveis de Soldagem
OES – *Optical Emission Spectrometry*
P - Penetração
 P_{ARC} – Potência do Arco
 P_B – Potência na Base
 P_D – Potência Destacado
 P_{PT} – Potência em Ponte
 P_P – Potência no Pulso
PPR – Pontos Por Rotação
PUL – Número de Pulsos do *encoder*
R – Reforço do cordão
 R_p – Recuo em Ponte
Rpm – Rotações por minuto
SCS – Sistema Cartesiano de Soldagem
 T_{AQI} – Intervalo de Aquisição
 T_c – Tempo de contato
 T_D – Tempo Destacado
 T_g – Tempo de formação de gota
 T_P – Tempo em Ponte
TP – *Tracking Point*
TIG – *Tungsten Inert Gas*
 U_{AE} – Tensão Arame-Eletrodo
 U_{AE_PT} – Tensão Arame-eletrodo em Ponte Metálica
 U_{AE_D} – Tensão Arame-eletrodo Destacada
 U_{AE_INST} – Tensão Arame-eletrodo Instantânea
 U_{ARC} – Tensão do Arco
 U_B – Tensão do Arco na corrente de Base
 U_D – Tensão do Arco em ponte Destacada
 U_{INST} – Tensão Instantânea do Arco
 U_P – Tensão do Arco na corrente de Pulso
 U_{PT} – Tensão do Arco em Ponte Metálica
 U_{REF} – Tensão de Referência
VA – Velocidade de Arame
 VA_{AV} – Velocidade Média de Avanço

V_{ACTE} – Velocidade de alimentação constante
 V_{AINST} – Velocidade de alimentação Instantânea
 V_{AMAX_AV} – Velocidade de Pico de Avanço
 V_{AMAX_R} – Velocidade de Pico de Recuo
 V_{AMED} – Velocidade de Arame Média
 V_{AOSC} – Velocidade Oscilatória
 V_{AR} – Velocidade Média de Recuo
 V_S – Velocidade de Soldagem
 V_T – Volume Transferido
 ZAC – Zona Afetada pelo Calor

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	28
2	OBJETIVOS	32
2.1	OBJETIVO GERAL	32
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	32
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	33
3.1	PROCESSO TIG.....	33
3.2	SOBRE A ALIMENTAÇÃO DE MATERIAL NO PROCESSO TIG	34
3.2.1	Alimentação convencional e alimentação dinâmica de arame	35
3.2.2	Quanto a posição de inserção de material	41
3.3	INFLUÊNCIAS DA ALIMENTAÇÃO DINÂMICA SOBRE O CORDÃO DE SOLDA E TRANSFERÊNCIA METÁLICA.....	54
3.4	TRANSFERÊNCIA METÁLICA NO PROCESSO TIG	61
4	MATERIAIS E MÉTODOS	69
4.1	BANCADA DE ENSAIOS.....	69
4.2	EQUIPAMENTOS PARA FILMAGEM EM ALTA VELOCIDADE E FOTOGRAFIA.....	72
4.3	CONSUMÍVEIS: ELETRODO, GÁS DE PROTEÇÃO E METAIS DE ADIÇÃO 74	
4.4	ENSAIOS METALOGRAFICOS	76
4.5	ENSAIO DE MICRODUREZA.....	79
4.5.1	Teste de microdureza em amostras de revestimento duro (hardfacing) 80	
4.6	SISTEMA DE AQUISIÇÃO E PÓS PROCESSAMENTO DE DADOS	81
4.6.1	Avaliação do sistema de medição da velocidade de alimentação de aramé 83	
4.7	MODULOS DE OSCILAÇÃO DO ARAME: MAD E MOC	85
4.7.1	Avaliação dos sistemas de alimentação dinâmica	87
4.8	CARACTERIZAÇÃO DA ALIMENTAÇÃO DINÂMICA DE ARAME NO PROCESSO TIG.....	89
4.9	ENSAIOS DE SOLDAGEM	100
4.9.1	Variação da frequência de oscilação de arame - MAD	100
4.9.2	Variação da amplitude de oscilação – MAD	103

4.9.3	Variação da frequência de oscilação para diferentes níveis de corrente – MAD	104
4.9.4	Ensaio variando posição de inserção do arame - MOC	105
4.9.5	Variação da distância eletrodo-arame (DEA) – MOC	108
4.9.6	Ensaio para medições de temperatura por termografia infravermelho – MOC	109
4.9.7	Sincronismo da alimentação dinâmica com corrente pulsada	112
4.10	ENSAIOS DE SOLDAGEM APLICADOS	115
4.10.1	Revestimento duro com carbeto de tungstênio	115
5	RESULTADOS	118
5.1	ENSAIOS PRELIMINARES	118
5.1.1	Avaliação do módulo de alimentação dinâmica - MAD	118
5.1.2	Avaliação do sistema de medição de velocidade de arame	122
5.1.3	Avaliação do Módulo oscilador de conduíte – MOC	130
5.2	SOBRE A VELOCIDADE DE ARAME	133
5.3	ENSAIOS DE SOLDAGEM	141
5.3.1	Variação da frequência de oscilação do arame – MAD	141
5.3.2	Variação da amplitude de oscilação do arame – MAD	164
5.3.3	Variação da distância eletrodo arame (DEA)	175
5.3.4	Variação da frequência de oscilação para diferentes níveis de corrente	180
5.3.5	Análise por termografia infravermelha	191
5.3.6	Variação da posição relativa de alimentação (Frontal, Lateral e Traseira)	197
5.3.7	Sincronismo da corrente pulsada e alimentação dinâmica	205
5.4	ENSAIOS DE SOLDAGEM APLICADOS	223
5.4.1	Revestimento duro com carbeto de tungstênio	223
6	CONCLUSÕES	231
7	TRABALHOS FUTUROS	234
8	REFERÊNCIAS	235

1 INTRODUÇÃO

Desde a sua invenção até os dias atuais, processos de soldagem têm sido amplamente utilizados em diversos campos da indústria, e é o processo de fabricação mais utilizado quando se trata de união de metais. Antes de sua invenção e popularização, rebites eram empregados na maioria das grandes estruturas metálicas presentes na construção civil, naval, automotiva etc., os quais, em alguns casos, foram aos poucos sendo substituído por cordões de solda como método de união permanente. À medida que o processo por eletrodo revestido foi sendo aprimorado e se popularizando no meio industrial, novos processos, bem como variantes, passaram a ser focos de pesquisa e desenvolvimento à medida que novas demandas por produtividade e qualidade foram surgindo. O processo TIG (do inglês *Tungsten Inert Gas*) por exemplo, foi desenvolvido durante o boom tecnológico promovido durante a Segunda Guerra Mundial, época em que a indústria aeronáutica carecia de tecnologias para união de ligas de alumínio e magnésio [1].

Ao longo dos anos, o constante avanço tecnológico propiciou inúmeros desenvolvimentos e aprimoramentos de equipamentos específicos para cada processo de soldagem. Os avanços da eletrônica durante as décadas de 60 e 70 possibilitaram que fontes de soldagem com controles mais refinados e com maior velocidade de resposta pudessem ser desenvolvidas, as quais, por sua vez, permitiram melhores controles sobre o processo e cordão de solda. Fenômenos que tangem à transferência metálica, estabilidade do arco, geometria da poça de fusão, microestrutura, diluição, acabamento de superfície, tratamento térmico (zona afetada pelo calor), são fenômenos inerentes ao processo de soldagem, os quais definem e caracterizam a qualidade do cordão e, de alguma forma, podem ser controlados, monitorados e manipulados de acordo com o processo de soldagem e a parametrização aplicada.

Neste contexto, além das fontes de soldagem com controle eletrônicos, algumas variantes do processo TIG e MIG/MAG experimentaram consideráveis avanços no que tange aos sistemas de alimentação de arame. Sistemas integrados à tocha de soldagem com motores de alta capacidade de torque, velocidade e precisão, possibilitam que diferentes métodos de alimentação de arame possam ser aplicados. A variante CMT (*Cold Metal Transfer*), por exemplo, do processo MIG/MAG desenvolvida pela Fronius, atribui tal sistema, também conhecido como sistema *push-*

pull, para realizar a movimentação de avanço e recuo do arame em sincronia com a corrente de soldagem. Neste processo, a transferência metálica ocorre não só pela ação das forças eletromagnéticas, mas também pela ação mecânica do movimento de recuo do arame durante o curto-circuito.

Já no processo TIG, os sistemas do tipo *push-pull* foram implementados pela empresa Air Liquide na tocha para sistemas robotizados denominada TopTIG, hoje sob domínio da empresa Lincoln Electric. O projeto da tocha, além do servo motor integrado que garante a adequada alimentação de material considerando dinâmica e constância da velocidade de alimentação, apresenta um bocal que permite a alimentação do arame de adição com baixo ângulo de inserção (ângulo entre arame e eletrodo), o que, segundo o fabricante, tem grandes vantagens no que tange ao aumento de taxa de fusão e da velocidade de soldagem [2].

Ainda sobre sistemas de alimentação e arame, mais recentemente, sistemas que permitem a movimentação do arame não só no sentido de avanço à poça de fusão, mas também de recuo, caracterizando um movimento oscilatório longitudinal ao eixo do arame, tem sido foco de desenvolvimento dos fabricantes de equipamentos. Embora a técnica tenha sido aplicada em estudos datados da década de 1980, a variante foi ter um sistema comercial apenas ao final da década de 1990 com o lançamento da empresa TipTIG, cuja patente fora desenvolvida pelo engenheiro austríaco Siegfried Plasch em 1999 (EP 1 080 818 A2) [3]. Segundo o fabricante, devido à oscilação do arame em elevadas frequências, na ordem de 18 Hz, esta variante permite maiores taxas de disposição de arame, cordões com melhores propriedades metalúrgicas e resistência a corrosão [4].

Certamente sob forte influência das estratégias de marketing promovidas pelas empresas do ramo de soldagem, as quais descrevem suas variantes como “milagres tecnológicos” e prometem formidáveis níveis de produtividades e qualidade, estas variáveis são encontradas em ambientes industriais, sobretudo em soldagem de união de dutos, para a tecnologia TipTIG, e manufatura aditiva para a variante TopTIG. Entretanto, estudos dedicados à investigação desses reais “milagres” são escassos e recentes na literatura técnica disponível, o que desperta grande interesse científico sobre as tecnologias de alimentação com baixo ângulo de inserção, bem como a alimentação com movimento oscilatório do arame no processo TIG.

Diante deste cenário, O laboratório de Soldagem e Mecatrônica da Universidade Federal de Santa Catarina (LABSOLDA – UFSC) busca não só

acompanhar as novas tecnologias que se apresentam no mercado, mas compreendê-las e dominá-las. Além de desmitificar tais tecnologias, o instituto dedica-se a desenvolver as variantes próprias e a divulgar, não apenas soluções tecnológicas, mas também apresentar novas frentes de aplicação dos processos baseadas em resultados contundentes, fruto da pesquisa de alto nível executada dentro das instalações do laboratório.

Dentro deste contexto, o presente projeto de pesquisa se enquadra na linha cronológica dos estudos dedicados a variantes do processo TIG com alimentação de arame desenvolvido ao longo dos últimos 20 anos pelo Labsolda. No ano de 2000, Delgado [5] defendeu o trabalho de mestrado o qual investigou correlações entre corrente de soldagem e velocidade de alimentação de arame para soldagem TIG automatizada. Em 2015, o presente autor, também em pesquisa de mestrado, apresentou consideráveis contribuições para o desenvolvimento de equipamentos e procedimentos dedicados à soldagem orbital de passe de raiz, onde fez o uso do processo TIG com corrente pulsada e alimentação de arame pulsada [6]. Seguindo a linha de soldagem orbital com processo TIG, Paes [7], em 2016, conclui o trabalho de mestrado onde investigou técnicas de alimentação dinâmica de arame (movimento oscilatório do arame) sob aplicações de soldagem orbital. Na pesquisa, o autor atribuiu frequências de oscilação na ordem de 2 Hz. Em 2017, Godinho [8] defendeu sua dissertação cujo foco foi dedicado em avaliar a variante TopTIG em preenchimento de juntas na posição plana. Seguindo a linha de pesquisa sobre o processo TIG, Riffel [9], em 2018, apresentou trabalho de mestrado onde foram avaliadas técnicas de alimentação dinâmica de arame na soldagem interna de tubos cladeados com ligas de níquel. Em 2019, Rosa [10] aplicou a tecnologia TopTIG na soldagem orbital de ligas inoxidáveis, pesquisa a qual também culminou em sua dissertação de mestrado. Por fim, Dorneles [11], em 2022, defendeu seu trabalho de mestrado cujo tema foi o estudo da alimentação dinâmica aplicada em processo PTA em procedimentos de manufatura aditiva.

Embora estudos tenham sido desenvolvidos, a maioria deles foram dedicados a aplicações específicas. Dando sequência à esta linha de pesquisa, o presente projeto busca investigar a técnica de alimentação dinâmica de arame conciliada a tecnologia TopTIG, focando na caracterização do processo, sobretudo da transferência metálica e influências sobre aspectos macro e microestruturais do cordão.

Embora ambas as variantes sejam consolidadas e utilizadas no mercado, poucos trabalhos caracterizam a transferência metálica bem como monitoramento desses processos que, por sua vez, demandam métodos mais avançados devido suas características físicas. Ademais, visto a complexidade e dinâmica dos eventos de transferência metálica nestas novas variantes, não existem atualmente no mercado sistemas disponíveis capazes de monitorar e quantificar eventos relacionados à transferência metálica quando há o emprego de alimentação dinâmica de arame. Neste sentido, o presente trabalho também busca propor novos métodos de monitoramento para controle do processo TIG com alimentação de material.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Investigar a transferência metálica no processo TIG com alimentação dinâmica de arame associada à inserção de topo, isto é, alimentação com baixo ângulo de inserção. A compreensão e controle da transferência metálica nos processos de soldagem tem fundamental papel no que tange à qualidade, repetibilidade e robustez do processo, possibilitando novas frentes de aplicação para os processos bem como o refino e domínio técnico de variantes já consolidadas, no entanto, carentes de estudos aprofundados, sobretudo do processo TIG.

2.2 Objetivos específicos

- Avaliar o comportamento dos módulos de oscilação do arame baseados nos princípios de oscilação do bloco de roletes e oscilação do conduíte;
- Caracterizar o processo, identificando os parâmetros indiretos, variáveis não reguladas, inerentes ao processo de soldagem TIG com alimentação dinâmica de arame em baixo ângulo de inserção (inserção de topo);
- Desenvolver métodos de monitoramento e controle para o processo TIG com alimentação dinâmica;
- Analisar a influência dos eventos relacionados à transferência metálica sobre o processo TIG na condição de alimentação dinâmica de material com base nos parâmetros identificados;

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Processo TIG

A invenção do processo TIG se deu durante a década de 1940, época em que a demanda por avanços tecnológicos era grande visto o acontecimento da Segunda Guerra Mundial. Neste cenário, o processo foi desenvolvido sob a necessidade de processos de soldagem para ligas de alumínio e magnésio para atender a indústria aeronáutica [1]. Em 1942 o processo fora patenteado por Russell Meredith, sob o nome de Heliarc, uma vez que utilizava o hélio como gás de proteção [12]. Desde então, o processo vem passando por contínua evolução e está entre os processos de soldagem mais utilizados na indústria, sendo reconhecido principalmente por proporcionar soldas de elevada qualidade, com baixos índices de descontinuidades [1, 13].

Do termo em inglês *Tungsten Inert Gas*, o processo TIG é caracterizado pelo estabelecimento de um arco elétrico entre o eletrodo de tungstênio, dito não consumível, e a peça. Para tanto, um fluxo de gás inerte faz a proteção do eletrodo e da poça de fusão à oxidação e que, ao ser ionizado, propicia a condução de corrente elétrica [14], possibilitando a estabilidade de um arco elétrico tanto em corrente contínua ou corrente alternada, sendo esta, empregada para soldagem de ligas de alumínio e magnésio. Ademais, com exceção da soldagem dessas ligas, o eletrodo de tungstênio é mantido na polaridade negativa (cátodo), sendo a peça o polo positivo (ânodo) do arco elétrico. No presente trabalho, será considerado apenas o uso de corrente contínua em polaridade invertida, isto é, eletrodo no polo negativo.

O presente trabalho tem como foco investigar às técnicas de alimentação de arame no processo TIG. Assim sendo, não será aprofundada a revisão quanto ao processo em si, considerando que princípios físicos básicos e características gerais já sejam de conhecimento base do leitor e podem ser facilmente encontrados na literatura [1, 15–17]. Assim sendo, a maior parte da revisão abordará questões relativa à alimentação de arame no processo TIG, novas variantes e transferência metálica.

3.2 Sobre a alimentação de material no processo TIG

Uma grande vantagem do processo TIG é a possibilidade da execução de procedimentos autógenos, isto é, sem a adição de material, sobretudo, em juntas de topo para união de chapas finas, como o caso apresentado por Dutra et al. [18], onde os autores empregaram o processo autógeno na soldagem de chapas de 1 mm de espessura. Entretanto, a máxima espessura atingida com o processo TIG convencional não ultrapassa em muito os 3 mm [19]. Além disso, dependendo das condições de junta e parametrização do processo, a soldagem sem adição de material pode levar a descontinuidades no cordão, tais como mordedura [20] e *humpping*, no caso do emprego de elevadas correntes e velocidades de soldagem [21–23].

Por outro lado, em algumas situações a própria geometria da junta demanda a adição de material, como é o caso de juntas chanfradas na união de chapas espessas, bastante presente na indústria naval e do petróleo e gás [6]. Outras aplicações onde é fundamental e necessária a adição de material são as aplicações de revestimentos por soldagem. Neste tipo de aplicação, uma camada de material é depositada sobre o metal de base buscando melhorar as propriedades mecânicas da peça no que tange à resistência ao desgaste por abrasão e à corrosão [24, 25].

Neste contexto, as técnicas de alimentação de arame no processo TIG podem ser categorizadas de acordo com as seguintes abordagens: quanto a variação da velocidade do arame, quanto à posição de inserção do arame e quanto à temperatura do metal de adição. Além dessas abordagens, em sua dissertação de mestrado, Godinho [8] também difere a alimentação de material no processo TIG quanto ao nível de automação, categorizando-a em alimentação manual (processos manuais com uso de varetas), ou automática, onde a adição de material (na forma de arame) provém de um cabeçote alimentador integrado à fonte de soldagem. Insere-se aqui também alimentação semiautomática. Nestes sistemas, o metal de adição é alimentado sob forma de arame, por meio de um cabeçote tradicional, entretanto, o direcionamento e acionamento da alimentação podem ser feitos manualmente pelo soldador com auxílio de um dispositivo mecânico [26]. Neste trabalho serão consideradas apenas as técnicas de alimentação automática de arame, uma vez que todo seu desenvolvimento se baseia em processos automatizados.

Nas próximas seções serão abordados aspectos relevantes que tangem a categorização das técnicas de alimentação de arame citadas.

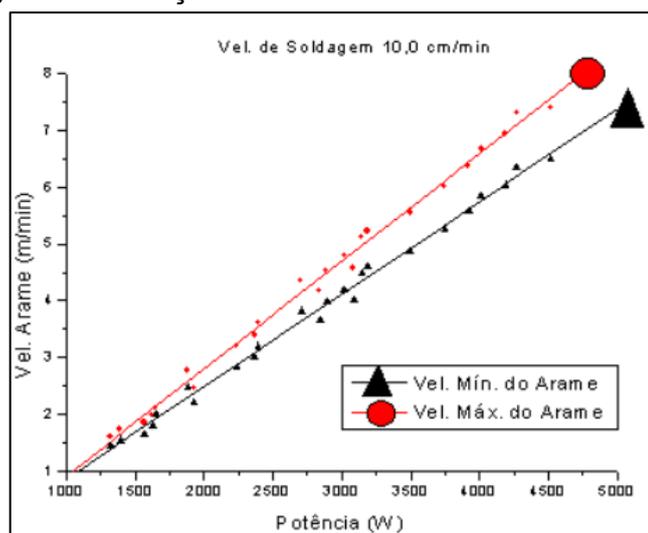
3.2.1 Alimentação convencional e alimentação dinâmica de arame

Uma primeira maneira de categorizar a alimentação de arame refere-se à variação da velocidade de alimentação. Convencionalmente, a alimentação do arame no processo TIG é feita com velocidade constante sempre em direção à poça de fusão. Neste trabalho será atribuído o termo “alimentação convencional” (AC) para este método.

Diferente dos processos de soldagem com eletrodo consumível, uma grande vantagem da adição de material no processo TIG é que esta é independente do processo em si, isto é, a regulagem de velocidade de alimentação do arame (VA) e é independente das regulagens dos parâmetros elétricos (corrente e tensão). Em termos práticos, a independência entre o aporte de calor proveniente do arco e adição de material facilita o controle do processo, por exemplo, em operações de manufatura aditiva quando comparado aos processos MIG/MAG [27]. Entretanto, embora haja a independência na regulagem dos parâmetros, existem limites e faixas operacionais do processo e sua parametrização tem uma relação direta com o modo de transferência metálica estabelecido.

Neste contexto, alguns autores correlacionam a velocidade de arame com os parâmetros elétricos, buscando definir os limites operacionais do processo TIG com alimentação de arame. Delgado [5] e Figueiroa et al. [28] sugerem uma metodologia baseada na relação entre velocidade de alimentação e potência de arco ($V_a/P - m \cdot J^{-1}$). A relação entre VA e a potência do arco apresenta linearidade (Figura 1), e pode ser uma boa alternativa para parametrização do processo TIG com velocidade de alimentação constante [27, 29, 30].

Figura 1 - Relação Velocidade de Arame x Potência.



Fonte: Delgado [5]

Em seu trabalho de mestrado, Delgado [5] buscou definir limites máximos e mínimos da velocidade de alimentação de arame para diferentes parametrizações do processo. Neste caso, o autor definiu o limite mínimo como a menor velocidade de arame que garanta o estabelecimento contínuo da ponte metálica, isto é, sem o destacamento de gotas, enquanto o limite superior é dado pela máxima velocidade sem que haja impacto do arame ainda sólido, com a peça. Neste sentido, Figueiroa et al. [28] buscou definir uma razão que garantisse a alimentação em ponte contínua, isto é, o arame sempre em contato com a poça de fusão. Segundo o autor, a razão ideal foi de $1,2 \times 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{J}^{-1}$. Entretanto, é importante ressaltar que esta relação não pode ser aplicada em qualquer situação, pois, além da velocidade de alimentação de arame, outros fatores influenciam no modo de transferência metálica, como por exemplo, o ângulo de inserção. Ademais, os autores utilizaram como variável independente a potência, porém diferentes configurações de comprimento do arco e corrente de soldagem podem resultar numa mesma potência, mas as variáveis de inserção de arame seriam diferentes. Aspectos relacionados à transferência metálica serão abordados na seção seguinte.

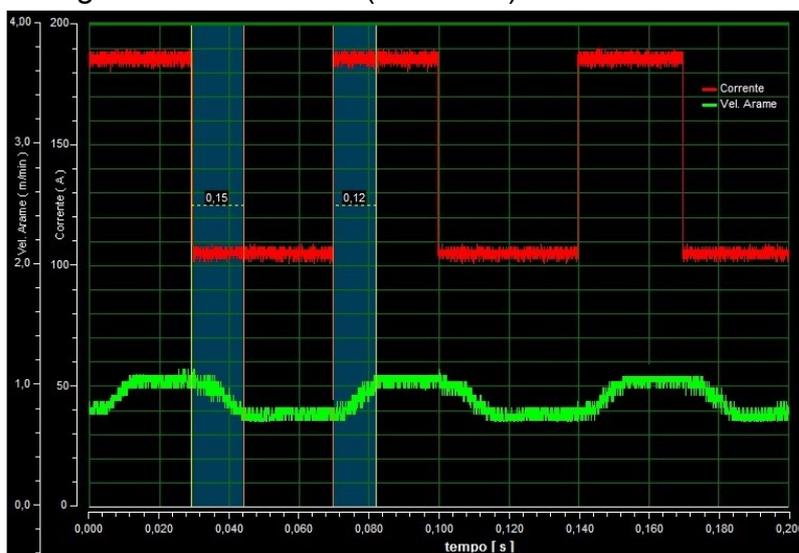
Diferente do processo TIG com corrente constante, se a velocidade de alimentação for mantida constante em procedimentos com corrente pulsada, a razão V_a/P , sugerida por Figueiroa et al. [28] não será mantida. Em procedimentos com corrente pulsada, de acordo com Zhao et al. [31], o alimentador de arame deve seguir

a formato da onda de corrente, aumentando a velocidade de arame nos períodos de pulso e reduzindo-a nos períodos de base.

A pulsação da velocidade de alimentação de arame em fase com a pulsação de corrente caracteriza um segundo modo de alimentação baseado neste parâmetro. Riffel [9] insere este método na alimentação contínua, uma vez que o arame está sempre em avanço, no sentido da poça de fusão. Porém, uma vez que a velocidade é pulsada, o autor propõe que o termo “alimentação pulsada” possa ser atribuído, diferenciando do termo “alimentação convencional”.

Pigozzo [6], em seu trabalho de mestrado, aplicou a técnica de alimentação pulsada em procedimento orbital de passe de raiz com o processo TIG em corrente pulsada. A Figura 2 mostra a pulsação da velocidade de arame levemente defasada em relação a pulsação da corrente.

Figura 2 - Oscilogramas de corrente (vermelho) e velocidade de arame (verde).

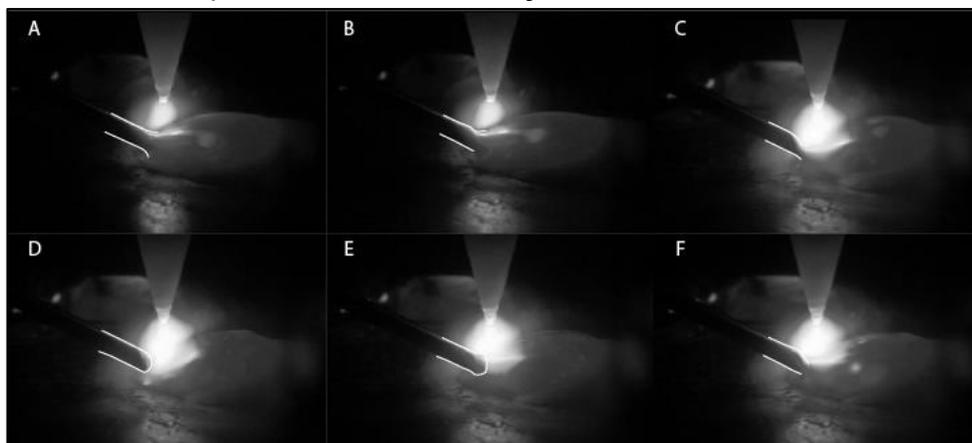


Fonte: Adaptador de Pigozzo [6].

O autor atribui este fenômeno à baixa dinâmica do sistema de alimentação de arame, o qual não acompanha a dinâmica da corrente de soldagem. O autor pontua que na transição da corrente de base para a pulsada acaba ocorrendo a ruptura da ponte metálica, mesmo que haja um incremento no valor de VA para o período de pulso. A ruptura ocorre pelo fato de que a transição da corrente de base para o pulso ocorre, pode-se dizer, instantaneamente, enquanto a VA apresenta uma rampa de aceleração, logo, a energia do arco durante o pulso de corrente acaba sendo muito elevada para a transição da velocidade do arame (Figura 3). Este mesmo

comportamento foi destacado por Silva et al. [32], onde o processo TIG pulsado com alimentação dinâmica foi utilizado na soldagem orbital de tubulação de aço inoxidável.

Figura 3 – Ruptura da ponte metálica no início do período de pulso. Processo TIG pulsado com alimentação convencional.



Fonte: Adaptado de Pigozzo [6].

Alguns equipamentos mais modernos fazem o uso de sistemas do tipo *push-pull*, os quais apresentam dois motores para alimentação de arame, um no cabeçote principal, responsável por fornecer arame à linha de alimentação, e outro acoplado a tocha de soldagem, responsável por garantir os parâmetros de velocidade de alimentação regulados. Dentre as tecnologias que fazem o uso destes mecanismos, destaca-se a variante CMT (*Cold Metal Transfer*) do processo MIG/MAG, desenvolvido pela empresa Fronius, e a variante TopTIG, hoje sob domínio da empresa Lincoln Electric.

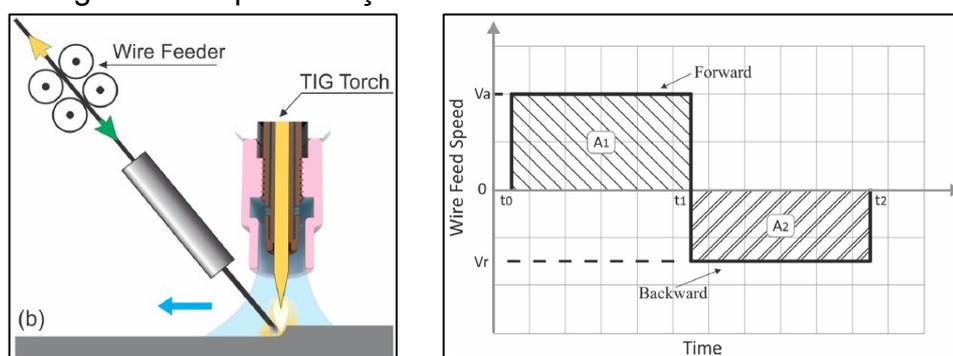
Pigozzo et al. [33] em um trabalho aplicando corrente pulsada sincronizada com alimentação de arame pulsada no processo TopTIG, avaliou a resposta da variação de velocidade do arame em relação a variação da corrente. Nesse trabalho, o autor mostra que o sistema do tipo *push-pull* apresenta uma resposta na ordem de 3 ms entre a pulsação da corrente a variação da velocidade de arame, e aceleração do arame de 0 m/min até as VA regulada levou em média 16 ms. Comparando com o resultado mostrado na Figura 2, este período é aproximadamente 10 vezes menor, o que mostra a eficiência dos sistemas *push-pull* na garantia da velocidade de arame regulada.

Ainda sobre este modo de alimentação de arame, Pigozzo et al. [33] sugere também o termo “alimentação dinâmica pulsada”. O autor define alimentação

dinâmica como uma técnica de alimentação de arame onde há variação da velocidade de alimentação em períodos determinados, podendo ser pulsada ou oscilante.

Neste sentido, a alimentação dinâmica oscilante define um terceiro método de alimentação de arame baseado na variação da velocidade de alimentação. Este modo é caracterizado pelo movimento oscilatório longitudinal do arame, promovendo o avanço e recuo do arame em direção à poça de fusão com frequência e amplitude definidas. A Figura 4 representa o movimento do arame para a alimentação dinâmica oscilatória. A velocidade positiva caracteriza o avanço do arame em direção à poça de fusão, enquanto a velocidade negativa caracteriza o recuo do arame. Para que haja avanço efetivo do material de adição, a velocidade de avanço deve ser maior do que a de recuo [34].

Figura 4 - Representação do movimento oscilatório do arame.

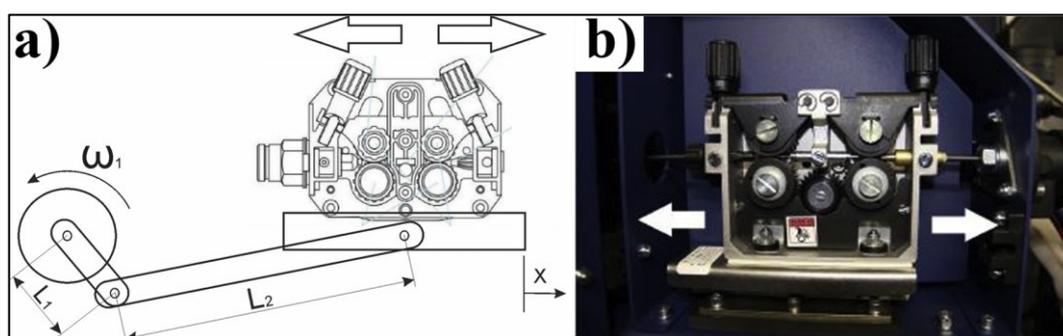


Fonte: Adaptado de Silva et al. [34]

O primeiro trabalho onde foi reportado o uso da oscilação longitudinal do arame foi publicado por Rudy em 1982 [35], onde a técnica foi nomeada de Dabber TIG. Segundo o autor, o movimento de avanço e recuo do arame permitiu com que um pequeno volume de material fosse adicionado à poça de fusão, uma vez que a oscilação previne a formação de uma gota grosseira na ponta do arame. Sobre este aspecto, Silva et al [36] relata que uma maior velocidade instantânea de alimentação durante o avanço do arame reduz o período em que o arame esteja submetido ao aquecimento do arco elétrico, reduzindo a fusão e a formação de uma gota grosseira. Em outro trabalho publicado por Silva et al [34], o autor afirma que a alimentação dinâmica permite uma transferência metálica estável mesmo com baixas velocidades de alimentação de arame, condições em que com a técnica convencional não seria possível de ser aplicada.

Embora os primeiros trabalhos tenham sido publicados na década de 1980, apenas em 1999, uma primeira versão comercial fora lançada pela empresa TIP TIG®. Neste sistema, um mecanismo tipo biela-manivela promove o deslocamento linear de avanço e recuo do bloco de roletes em uma frequência fixa de 18 Hz (Figura 5). De acordo com o fabricante, a agitação mecânica da poça de fusão ocasionada pela vibração do arame prolonga a fluidez do material líquido e quebra a tensão superficial da poça de fusão [37]. Destaca-se aqui o forte apelo comercial proposto pelo fabricante pelo uso equivocado dos termos “quebra de tensão superficial” e “prolongamento da fluidez” da poça metálica. De acordo com Craig [38], a dinâmica da poça é alterada e a torna o processo permite operar com maiores velocidades de arame e taxa de deposição. Segundo o autor, a taxa de alimentação de arame aumenta na ordem de 200 a 400 % em comparação com o TIG manual. Ademais, aumenta-se também o tempo de solidificação da poça de fusão, permitindo com que mais material possa ser adicionado, além de maiores velocidades de soldagem [4, 38, 39].

Figura 5 – A) Mecanismo de oscilação TIPTIG. B) Bloco de roletes.



Fonte: Adaptado de [32].

Além do TipTIG, a empresa alemã EWM apresenta outra versão comercial para alimentação dinâmica de arame, denominada de TIG Speed. Assim como o sistema TipTIG, o TIG Speed também promove o deslocamento do bloco de roletes por meio de uma mecanismo biela-manivela. De acordo com a fabricante EWM, a oscilação do arame implica na agitação da poça metálica, a qual, por sua vez, se adere melhor nas paredes adjacentes das juntas, reduzindo defeitos como falta de fusão [40]. Além da alimentação oscilante, esta variante apresenta um modo chamado de *Super Puls*, onde não há oscilação do bloco de roletes e o controle da velocidade

se dá no modo pulsado, isto é, velocidades diferentes em períodos distintos, conforme mencionado anteriormente [40].

Mais recentemente, a empresa austríaca Fronius lançou uma variante do processo a qual nomeou de TIG *Dynamic Wire* (Arame Dinâmico). De acordo com o fabricante, a velocidade do arame é ajustada automaticamente de acordo com a condição do processo [41]. Neste caso, a variação da velocidade de arame também é caracterizada pela alimentação pulsada. De acordo com Willinger [42], esta variante se fundamenta no movimento que o soldador faz em procedimentos manuais com alimentação de material na forma de varetas, e o controle da velocidade do arame faz com que o processo se adapte para diferentes condições, suprimindo tolerâncias dimensionais dos componentes em até 30 %. Entretanto, devido ao recente lançamento dessas variantes (Tig Speed e TIG Dynamic Wire), pouco material é encontrado na literatura técnica, carecendo de informações e resultados ditos “não comerciais” a respeito da tecnologia.

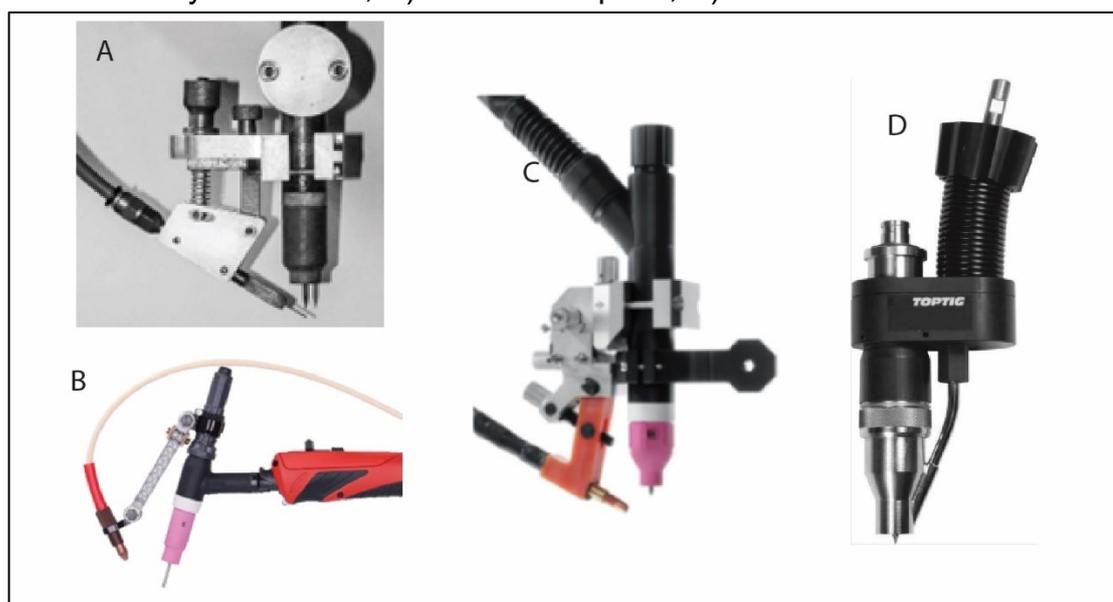
Por fim, diferente da alimentação em velocidade constante, tanto a pulsação da velocidade quanto a oscilação do arame impõem variações no movimento efetivo da ponta do arame de adição inserido na poça. Neste contexto, diferentes autores atribuem terminologias diferentes para os métodos apresentados. Rudy [35] atribuiu o termo “Dabber TIG”, do inglês *dab* (tocar), para a alimentação com movimento oscilatório. Silwal e Santangelo [43], assim como o fabricante TipTIG [44], atribuíram o termo “vibratório”, enquanto Jorge et al [45] chamam de “alimentação pulsada” de arame. Paes [7], Silva et al. [46], Riffel [9] e Dorneles [11] aderiram ao termo “alimentação dinâmica” para definir esta técnica de alimentação de arame, assim como a fabricante EWM em referência à tecnologia TIG Speed e a Fronius em relação ao TIG Dynamic Wire. No presente trabalho, também será considerado o termo “alimentação dinâmica” de arame, distinguindo-a em pulsada e oscilante.

3.2.2 Quanto a posição de inserção de material

Uma segunda maneira de categorizar as técnicas de alimentação de material no processo TIG se baseia no posicionamento do arame em relação ao arco, eletrodo ou poça de fusão. Nos equipamentos de soldagem TIG, os cabeçotes de alimentação de arame se assemelham aos cabeçotes de equipamento MIG/MAG, e fontes de energia multi-processos acabam utilizando os mesmos dispositivos para ambos os processos.

Porém, em se tratando de um processo com eletrodo não consumível, o metal de adição é inserido por meio de direcionadores, que promovem a inserção do arame externamente ao arco elétrico. Na maior parte dos casos, os direcionadores são equipamentos acoplados às tochas de soldagem, sejam elas manuais ou automatizadas (Figura 6).

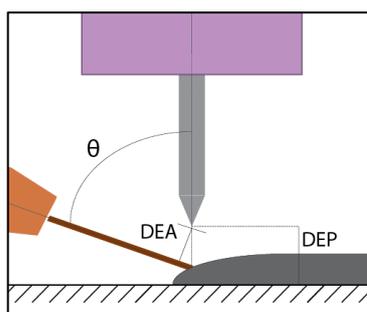
Figura 6 – Exemplos de direcionadores de arame para processos automatizados e manuais. A) Direcionador desenvolvido pelo LABSOLDA – UFSC; B) Fronius Dynamic Wire; C) EWM TIG Speed; D) Lincoln TOPTIG.



Fonte: adaptado de [6, 39, 41, 47].

Uma vez que o metal de adição é alimentado de fora para dentro do arco, isto é, não é coaxial ao eixo do arco elétrico, a posição na qual o arame é inserido na poça de fusão torna-se um parâmetro de soldagem. Como mostra a Figura 7, a posição relativa entre arame e eletrodo é definida pelo Ângulo de Inserção (Θ), o qual consiste no ângulo entre os eixos do arame e do eletrodo, e pela Distância Eletrodo Arame (DEA), a qual é definida pela menor distância entre a ponta do eletrodo e o arame.

Figura 7 – Parâmetros de direcionamento do arame

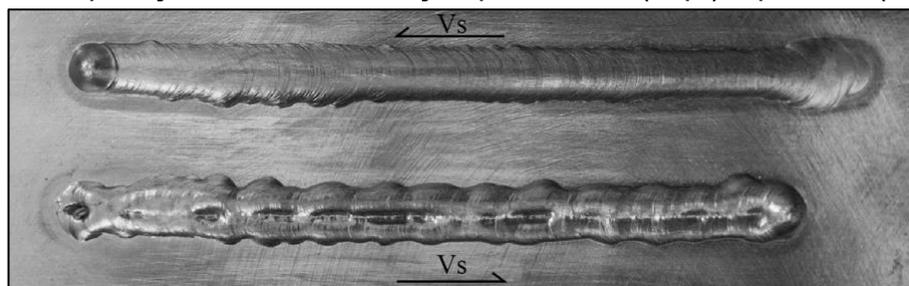


Fonte: adaptado de Pigozzo [6].

Geng et al. [27] destaca que o posicionamento do arame não deve ser realizado de maneira arbitrária, uma vez que influi diretamente na geometria do cordão, assim, além dos parâmetros de soldagem, a maneira com que se insere o metal de adição é uma variável que deve ser considerada na otimização dos processos. Rodriguez et al. [48], em um trabalho sobre manufatura aditiva, apontam que a não coaxialidade do arame com eletrodo acaba por alterar a estabilidade do processo quando ocorre a mudança de direção na soldagem, uma vez que a posição do arame relativa à poça de fusão também muda, e devido à alta sensibilidade da transferência metálica com a variação da altura do arco.

Neste sentido, o material pode ser inserido na região frontal, lateral ou traseira do arco / poça de fusão, isto é, a posição de inserção relativa ao deslocamento da tocha. Pigozzo [6], em experimentos utilizando a técnica de arame frio, mostrou que para um ângulo de inserção em 70° e DEA de 1,5 mm, a alimentação pela região traseira do arco induz a formação de “sulcos” sobre a superfície do cordão (Figura 8 – inf.), uma vez que o arame é inserido em regiões mais frias da poça, próximo à linha de fusão. Este mesmo resultado também fora obtido por Delgado [5] que realizou testes comparativos entre alimentação por trás e pela frente do arco também nas posições vertical e sobre-cabeça. Em todas as posições a alimentação por trás apresentou defeitos na superfície do cordão.

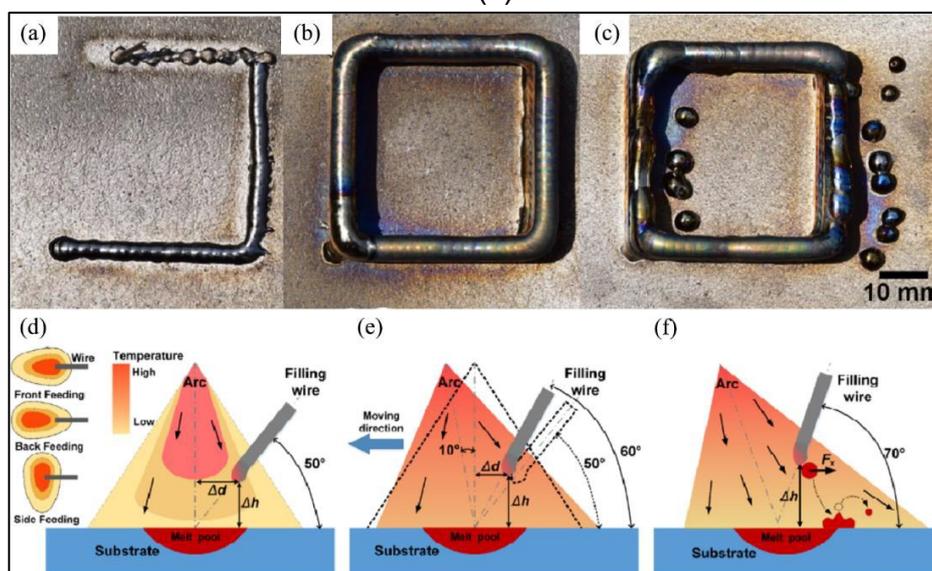
Figura 8 – Comparação entre alimentação pela frente (sup.) e por trás (inf.) do arco.



Fonte: Pigozzo [6]

Wu et al. [49] variou a posição relativa do arame (frente, lateral e trás) para diferentes ângulo de alimentação. Segundo o autor, para o ângulo de 50° não foi possível efetuar a alimentação por trás (Figura 9 - A), dado que o arame é alimentado na região de menor temperatura da poça de fusão, entretanto, diferente dos resultados obtidos por Pigozzo [5, 6] e Degado [5], neste caso o arame não chegou a fundir, interrompendo o processo de deposição. Para os ângulos de 60° (Figura 9 - B) o autor obteve bons resultados nas três condições, enquanto para 70° , o arco passou a excluir gotas da ponta do arame na posição de alimentação lateral (Figura 9 - C). É importante ressaltar que nos ensaios realizados, além do ângulo de inserção, o ângulo de inclinação da tocha variou juntamente com o arame, conforme pode ser visto na Figura 9 E e F.

Figura 9 – Cordões depositados com ângulo de alimentação de 50° (a), 60° (b) e 70° (c).

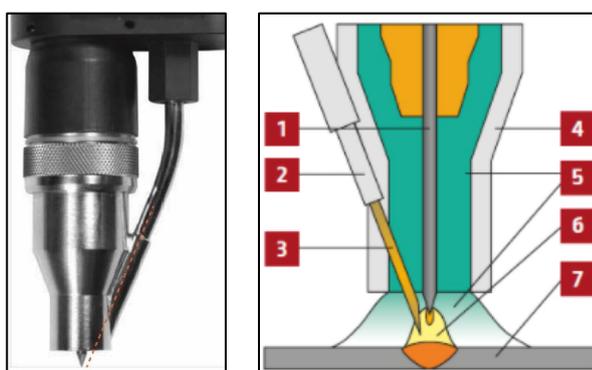


Fonte: Wu et al. [49]

Syed et al. [50], em depósitos realizados com o processo laser, afirma que a alimentação de arame pela frente apresenta melhores acabamentos da superfície do cordão, enquanto a alimentação por trás induziu a defeitos do tipo “serrilhados” e “sulcos”, pelo fato de que o arame sólido empurra o material em solidificação, próximo à linha de fusão, para frente.

Dada a problemática da alimentação do arame, uma alternativa para o processo TIG foi a tecnologia TopTIG, desenvolvida pela Air Liquide, que foi adquirida pela empresa Lincoln Electric. Nesta variante, o metal de adição é inserido, por meio de um bocal guia, com um ângulo de inserção reduzido à 20° (entre arame e eletrodo), com uma pequena distância entre o eletrodo e o arame (Figura 10).

Figura 10 – Esq.) Bocal TopTIG; Dir.) representação do processo TopTIG: 1-Eletrodo; 2- Direcionador de arame; 3-Arame; 4-bocal; 5-gás de proteção; 6-Arco elétrico; 7-peça.

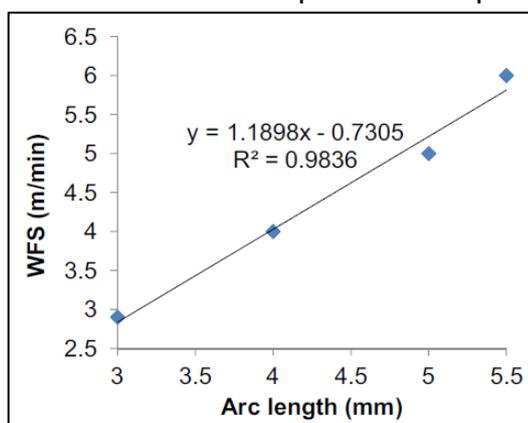


Fonte: Adaptado de Opderbecke e Guiheux, [47]

De acordo com Fortain et al. [51], ao inserir o arame num local bastante próxima da ponta do eletrodo, em uma região mais quente do arco (em comparação com a região de inserção radial) (Figura 10), aumenta-se a taxa de fusão do processo. De acordo com a desenvolvedor da tecnologia, a distância eletrodo arame (DEA) não deve exceder $1,5x$ o diâmetro do eletrodo [2]. Nesta região, as isotermais chegam a atingir temperaturas na ordem de 20.000 K [15]. Hirota [52] sugere que com esta configuração ocorre um “efeito” *hot-wire*, visto que o arame é aquecido tanto pelo calor do arco, quanto por efeito Joule, provocado pela passagem de corrente de derivação no comprimento do arame. Rosa [10] considera que a proximidade do arame com o eletrodo e o ancoramento do arco sobre o metal de adição aumenta o aquecimento anódico, possibilitando maiores taxas de fusão. Rodriguez et al. [48] conduziram

experimentos com diferentes comprimentos de arco com a variante TopTIG e afirma que maiores comprimentos induzem à maior taxa de fusão, visto que o arame fica em contato com o arco por um maior período. Os resultados obtidos pelos autores mostram que para uma DEP de 3 mm a máxima velocidade de arame foi 2,9 m/min para a corrente de soldagem de 220 A, enquanto para a DEP de 5,5 mm, a máxima velocidade foi de 6,0 m/min. Ademais, o autor mostra que há uma relação linear entre a velocidade de arame e comprimento do arco para a condição de transferência metálica em ponte contínua, analogamente ao método proposto por Delgado [5]. Silva et al. [53] também reportou maiores taxas de deposição quando aplicou a tecnologia em soldagem orbital de tubos de aço inoxidável 304L.

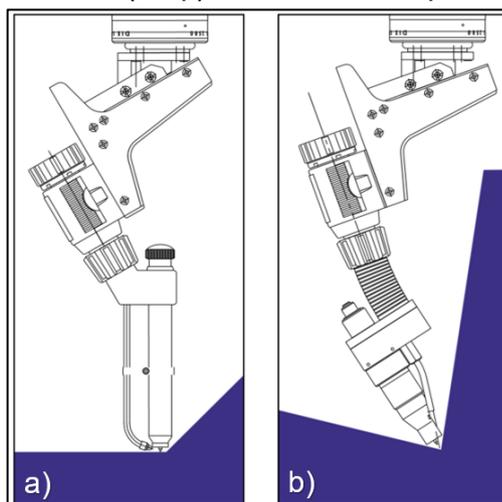
Figura 11 – Relação linear entre velocidade máxima de arame e altura do arco para corrente de 220 A no processo TopTIG.



Fonte: Rodriguez et al. [48]

Originalmente, esta variante fora desenvolvida buscando soluções para a soldagem e brasagem de chapas finas galvanizadas na indústria automotiva, componentes de baixa soldabilidade para processos GMAW, conforme afirmam Fortain et al. [54]. Os autores destacam também que um dos principais diferenciais da tecnologia está no projeto da tocha, sobretudo do bocal, que possui o alimentador de arame integrado, com posição e ângulo fixo em 20°. Este tipo de configuração minimiza o possível desalinhamento da direção de alimentação do arame [47]. Ademais, o projeto compacto do direcionador de arame integrado ao bocal confere uma melhor acessibilidade da tocha a juntas com geometria complexas e difícil acesso (Figura 12) [2].

Figura 12 – Comparação entre as acessibilidades das tochas com alimentadores convencionais (esq.) e o sistema TopTIG® (dir.).



Fonte: Air Liquide Welding [2].

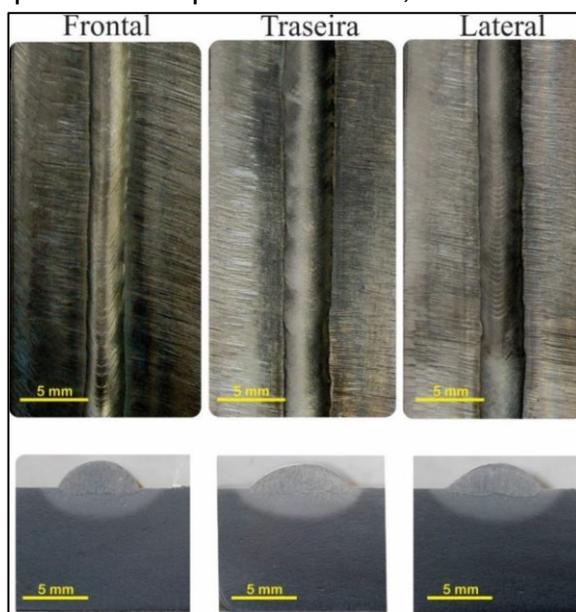
Dada as características da tecnologia TopTIG, uma das informações encontradas na literatura é que o baixo ângulo de inserção do arame, neste caso de 20°, permite a mudança na trajetória da tocha sem a necessidade de alterar a posição de inserção relativa do arame. Neste contexto, Rodriguez et al. [48] atribuem o termo “alimentação coaxial” do arame, visto o baixo ângulo de inserção e proximidade entre arame e eletrodo, fazendo menção aos processos GMAW, onde o arame-eletrodo é inserido de maneira coaxial ao eixo do arco. Entretanto, o termo é erroneamente empregado, visto que não há total coaxialidade entre o arame e o eletrodo neste modo de alimentação.

Uma vez que esta variante apresenta menor susceptibilidade a variações nas características geométricas do cordão com a mudança de trajetória, a automação com uso de manipuladores robóticos torna-se mais simples e com maior grau de liberdade para deslocamento da tocha [47, 54]. Entretanto, dada a pequena DEA recomendada pelo fabricante (1,5x diâmetro do eletrodo), é sugerido que alimentação de arame seja feita pela parte posterior do arco, isto é, alimentação traseira [2].

Para avaliar a influência da posição de inserção relativa do arame Godinho [8], em seu trabalho de mestrado, realizou depósitos sobre chapas utilizando a variante TOPTIG nas três diferentes posições de alimentação (pela frente, pelo lado e por trás do arco). Os resultados obtidos por esse autor mostram que há uma diferença significativa na geometria dos cordões, sobretudo entre alimentação frontal e traseira. Esse autor destaca que tanto a altura do reforço quanto o ângulo de molhamento e

diluição são maiores para alimentação frontal, enquanto a largura do cordão é menor quando comparado à alimentação por trás. Para todas as geometrias, a alimentação lateral apresentou valores intermediários às outras duas posições.

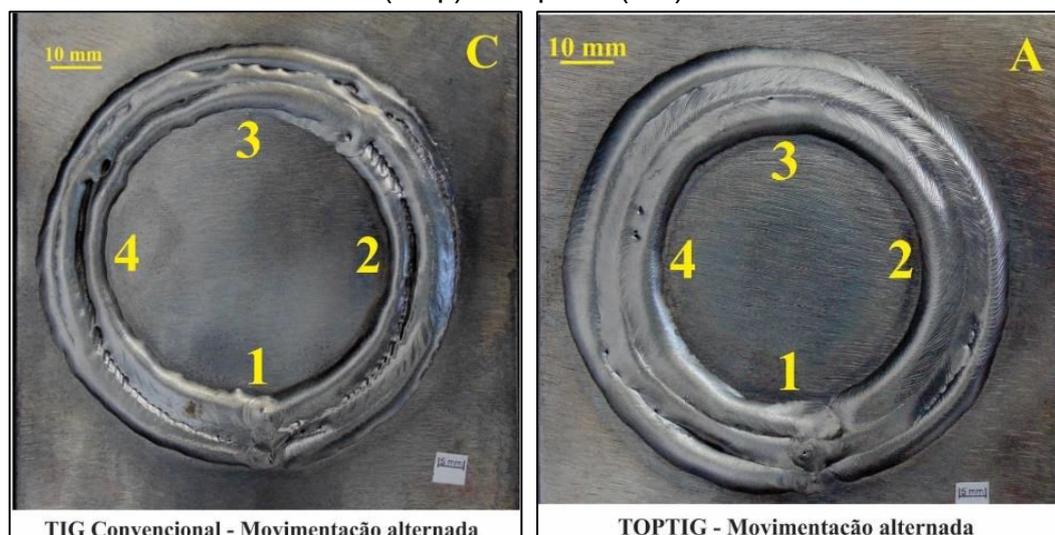
Figura 13 – Aspecto dos cordões e macrografias para as diferentes posições de inserção do arame no processo TopTIG. $I = 220$ A, $V_s = 30$ cm/min e $V_A = 2,4$ m/min.



Fonte: Godinho [8].

Neste mesmo trabalho, Godinho [8] compara a variante TopTIG com a técnica de alimentação convencional. Como não houve mudança na orientação da tocha, ao longo da circunferência a posição relativa de inserção do arame foi alterando e, por esta razão, os resultados obtidos pelo autor mostram que o processo convencional não apresentou boa sobreposição dos cordões ao longo de toda a amostra (Figura 14 – esq.). Entretanto, embora houvesse melhoria na sobreposição para o ensaio realizado com a variante TopTIG, nota-se que em alguns pontos ainda houve falta de uniformidade da sobreposição dos cordões (Figura 14 – dir.). De certa forma este resultado era esperado, dado os resultados obtidos pelo autor em depósitos sobre chapa, mostrados anteriormente.

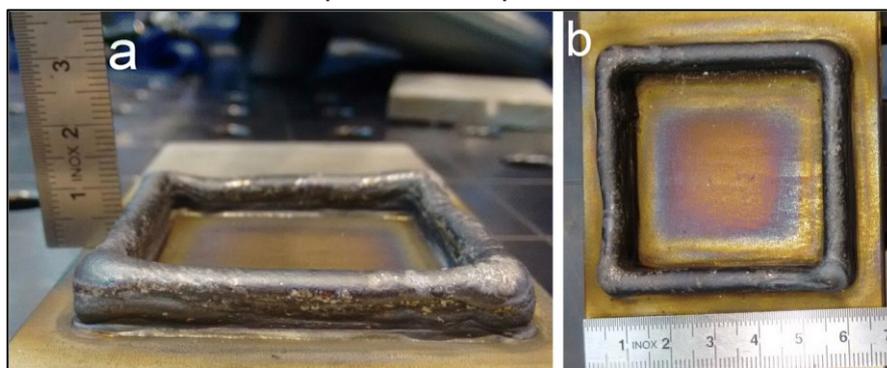
Figura 14 – Sobreposições de cordões realizados pelo processo TIG Convencional (esq.) e TopTIG (dir.).



Fonte: Adaptado de Godinho [8].

No trabalho publicado por Rodriguez et al. [48], os autores realizaram a sobreposição de cordões em camada única utilizando o processo TopTIG numa trajetória quadrangular, isto é, em cada direção de soldagem houve alteração da posição relativa de inserção do arame. Embora esses autores atribuíram certa coaxialidade ao processo e afirmaram que não há variações consideráveis na geometria do cordão, ainda assim o resultado obtido (Figura 15) mostra que não há uma plena uniformidade entre as direções. Entretanto, o artigo publicado carece de discussões a respeito deste resultado.

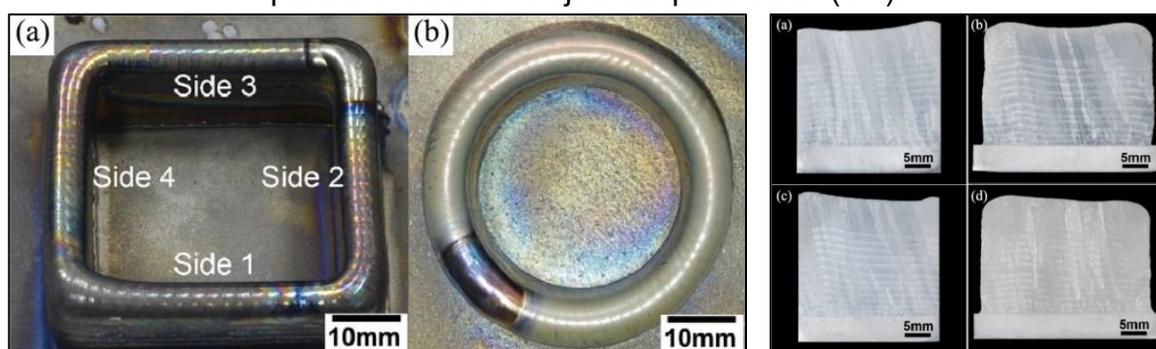
Figura 15 – Amostra de sobreposição de camadas em trajetória quadricular pelo processo TopTIG.



Fonte: Rodriguez et al. [48].

Wu et al. [49], analogamente ao experimento apresentado acima, realizaram ensaios com ângulo de alimentação de 30° , com trajetórias quadricular e circular (Figura 16). Os autores afirmam que as variações geométricas são mínimas e praticamente não houve variação significativa na média das alturas e larguras dos depósitos para as diferentes posições de inserção do arame.

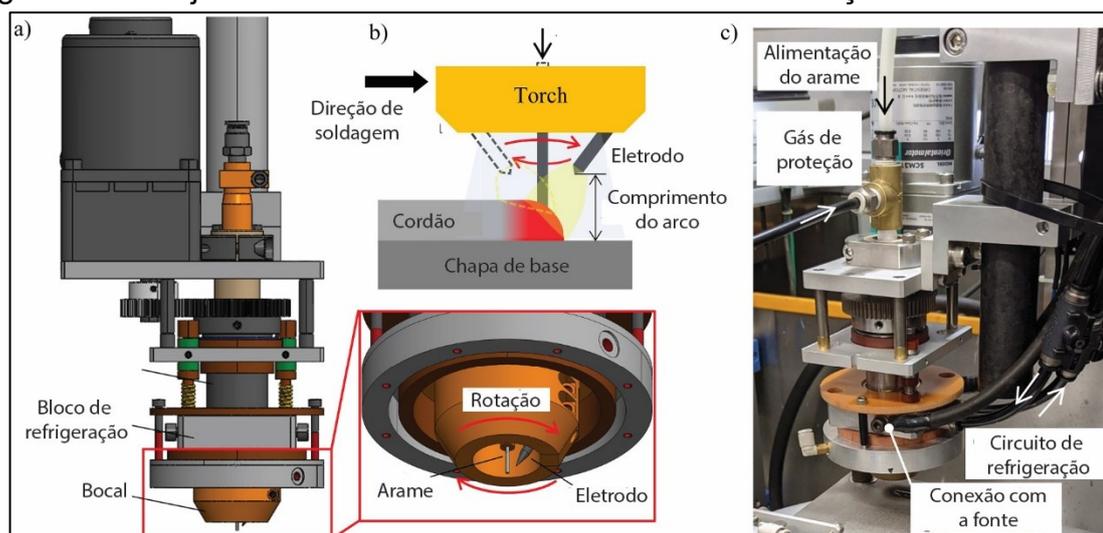
Figura 16 – Resultados de amostras realizadas em trajetória quadricular e circular para processo TIG com ângulo de alimentação de 30° (esq.) e seções macrográficas para o ensaio em trajetória quadricular (dir.).



Fonte: Adaptado de Wu et al. [49].

A problemática da variação da geometria do cordão em procedimentos com mudanças de trajetórias, sobretudo devido à alteração da posição de inserção do arame tem sido objeto de estudo de muitos autores. Além das “soluções” apresentadas pela alimentação com baixo ângulo de inserção, alguns autores sugerem outros métodos para minimizar os efeitos da mudança de direção no processo TIG alimentado. Kawabata et al. [55] desenvolveram um equipamento cuja alimentação de arame se dá pelo centro da tocha, de maneira coaxial. Para tanto, o eletrodo é inclinado em direção ao centro da tocha com um ângulo de 30° e fixado em um bocal rotativo, permitindo o giro livre em 360° em torno do arame (Figura 17).

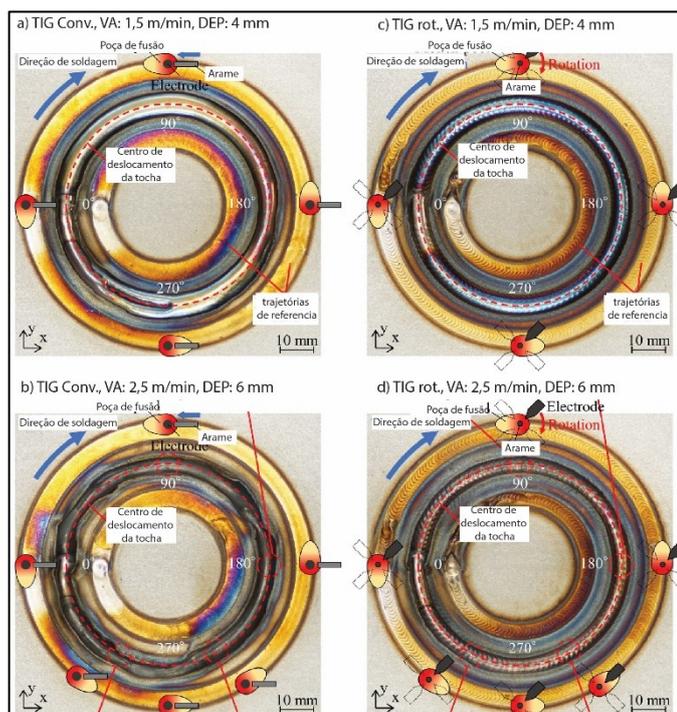
Figura 17 – Projeto de tocha com eletrodo rotativo e alimentação coaxial de arame.



Fonte: adaptado de Kawabata et al. [55].

Dentro dos resultados obtidos, destaca-se o estudo comparativo entre a técnica rotacional desenvolvida com alimentação convencional com ângulo de inserção de 30° pela frente do arco (Figura 18). Para a técnica convencional, nas posições de 0 e 180° , quando o arame é inserido lateralmente, a poça de fusão é desviada para o lado, ocasionando alterações no centro de trajetória do cordão. Neste sentido, Wang et al. [56] sugerem que o desalinhamento da poça de fusão quando o arame é inserido lateralmente advém da variação da posição de fusão do arame em relação ao arco/poça de fusão. Ademais, o autor afirma que este desalinhamento é minimizado para condições de maior aporte de energia, visto que a poça de fusão apresenta maior fluidez e capacidade de “absorver” rapidamente o arame fundido. Kawabata et al. [55], diante desse contexto, observaram maiores desvios na condição de maior velocidade de arame, conforme pode ser visto na Figura 18b. Já para os ensaios com eletrodo rotacional, o autores afirmam que praticamente nenhum desvio da poça de fusão, resultando num cordão uniforme em todas as direções.

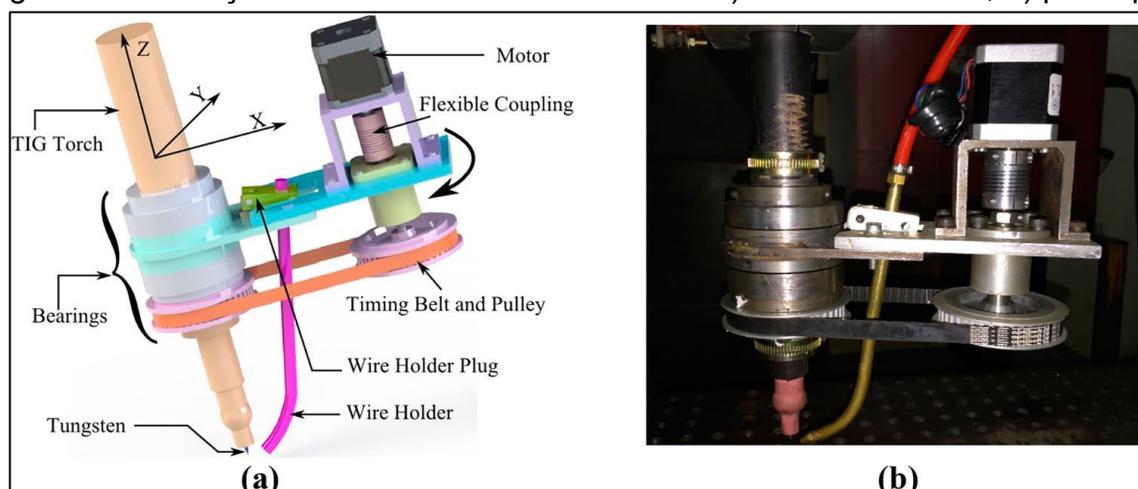
Figura 18 – Depósitos circulares com técnica de eletrodo rotacional e alimentação convencional para diferentes velocidades de arame e distância eletrodo peça.



Fonte: adaptado de Kawabata et al. [55].

No contexto de sistemas omnidirecionais, Kapil et al. [57] adaptaram um sistema de alimentação de arame que varia a posição de inserção do arame relativa ao deslocamento, de forma que, independente da variação da direção e deslocamento da tocha, o arame fosse inserido sempre pela frente do arco (Figura 19).

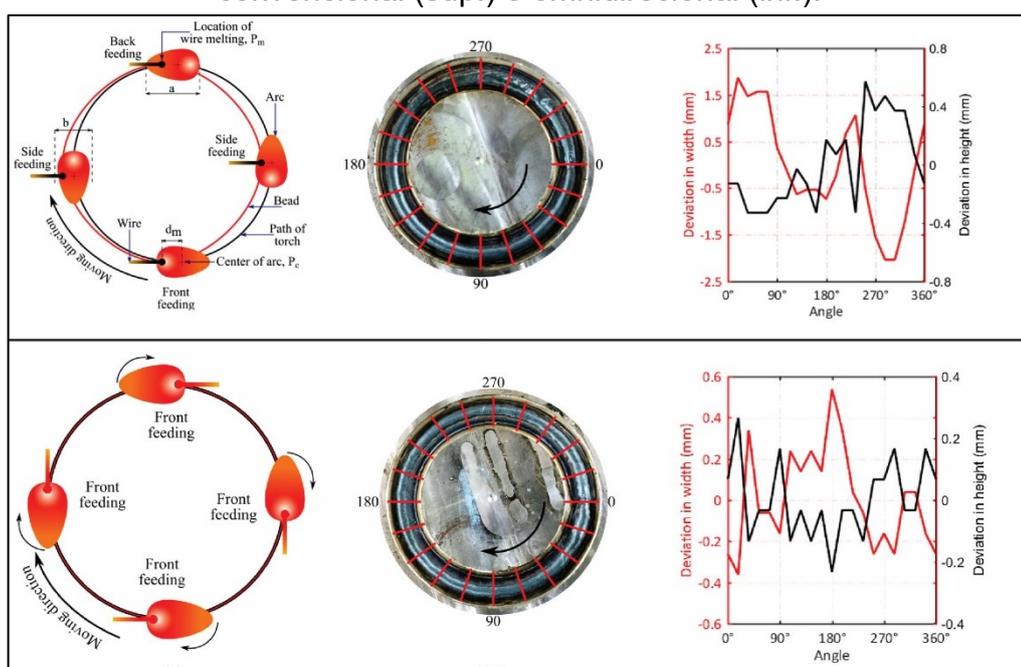
Figura 19 – cabeçote de tocha TIG omnidirecional. a) Modelo em CAD; b) protótipo.



Fonte: Kapil et al. [57].

Os resultados obtidos pelos autores mostraram que as variações na altura e largura do cordão ao longo de um depósito circunferencial foram muito menores para o sistema desenvolvido, onde o arame fora sempre alimentado pela frente, que para a alimentação convencional onde em cada posição de deslocamento da tocha a posição de inserção variava (Figura 20). Embora as distorções fossem minimizadas, ainda assim houve variação geométrica, diferentemente do protótipo rotacional desenvolvido por Kawabata et al. [55].

Figura 20 – Comparação da variação na largura e altura do cordão para TIG convencional (sup.) e omnidirecional (inf.).



Fonte: adaptado de Kapil et al. [57].

Por fim, assim como para a variação da velocidade de alimentação, também não há um consenso nos termos técnicos utilizados para as diferentes configurações de ângulo de alimentação de arame. Embora o fabricante utilize o termo “alimentação com ângulo reduzido”, Rodriguez et al. [48], conforme já mencionado, atribuem o termo “alimentação coaxial”. Godinho [8] sugere os termos “alimentação radial” para elevados ângulos de alimentação, uma vez que o arame penetra de maneira radial ao arco elétrico; e “alimentação tangencial” para a técnica de alimentação com baixo ângulo de inserção, neste caso, o TopTIG. Este mesmo termo também fora utilizado por Rosa et al. [10, 58]. Entretanto, não há uma explicação coerente sobre o uso do termo “tangencial”, pois os próprios autores afirmam que o arame é inserido

paralelamente à ponta do eletrodo. Neste trabalho, será atribuído o termo “inserção de topo” para a configuração da variante TopTIG, fazendo uma referência ao próprio nome da variante, quanto pela região do arco que o arame é inserido, isto é, pelo topo do arco.

3.3 Influências da alimentação dinâmica sobre o cordão de solda e transferência metálica

Embora as variantes que introduzem a alimentação dinâmica de arame no processo TIG estejam disponíveis no mercado há mais de uma década, são poucos os trabalhos disponíveis na literatura que abordam a influência da alimentação dinâmica de arame sobre o cordão de solda. Ademais boa parte deles são fontes com propósitos comerciais. Entretanto, nesta seção será abordada uma breve revisão sobre as influências da alimentação dinâmica na transferência metálica bem como sobre a macro e microestrutura do cordão de solda.

No que tange à geometria dos cordões, Jorge et al. [59] obtiveram uma redução próximo à 20 % na largura do cordão em procedimento utilizando alimentação dinâmica com frequência de oscilação de 15 Hz. Os autores também pontuam que mesmo com uma potência de arco menor para o caso com alimentação dinâmica, na ordem de 100 W menor, o cordão apresentou um incremento de aproximadamente 40% na penetração. Riffel et al. [60] obtiveram resultados similares na soldagem da liga Inconel 625 aplicando alimentação dinâmica. Neste trabalho, os autores variaram a frequência de oscilação (0, 5 e 10 Hz) para dois níveis de corrente (200 e 250 a). Para uma corrente de soldagem de 250 A, os procedimentos com alimentação dinâmica apresentaram menor largura para frequências de oscilação maiores. Entretanto, a penetração foi menor, em contraposição aos resultados apresentados por Jorge et al [59]. A menor penetração levou a uma menor diluição, sendo aproximadamente 38 % para alimentação dinâmica e 60 % para alimentação convencional. Para a corrente de 200 A, não houve diferenças significativas na geometria dos cordões. Com referência à altura do cordão, ambos os autores obtiveram maiores reforços com alimentação dinâmica.

Ainda com referência à geometria do cordão, Cunha et al. [61] avaliaram a alimentação dinâmica em três níveis de velocidade de arame (0,5, 1,5 e 2,2 m/min), de amplitude (2, 5 e 8 mm) e frequência de oscilação (2, 10 e 18 Hz). Os resultados

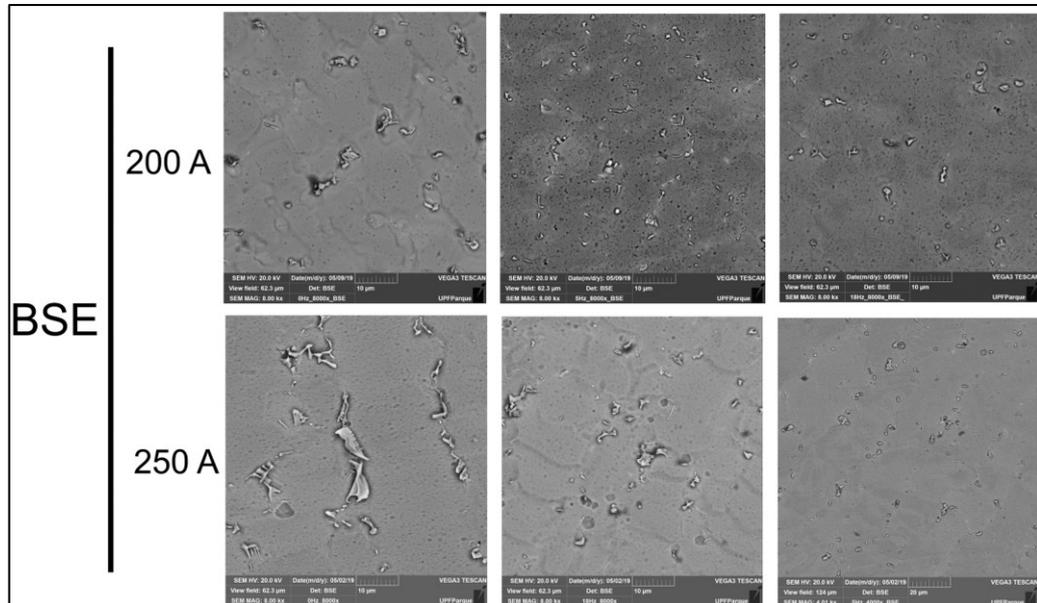
obtidos por esses autores mostram que para cada velocidade de arame e amplitude, o aumento da frequência de oscilação tende a diminuir a largura do cordão. Já para a penetração, os resultados variaram de acordo com cada condição. Para menor velocidade de arame (0,5 m/min), a penetração diminuiu com o aumento da frequência de oscilação em todas as amplitudes. Assim como os resultados obtidos por Riffel et al [60], os resultados apresentados por Cunha [61] et al. contrapõe aos apresentados por Jorge et al. [59]. Segundo Riffel et al [60], o tipo de oscilador utilizado por Jorge et al, o qual promove apenas o movimento de recuo do arame, o comprimento de arame inserido na poça de fusão é menor, logo remove menos calor, aumentando a penetração. Em comparação com o resultado obtido com alimentação convencional, a penetração foi menor em todas as condições com menor velocidade de arame. Entretanto, para velocidades de 1,5 e 2,2 m/min, a alimentação convencional apresentou menor penetração que as demais condições. Já para a o reforço dos cordões, na menor velocidade de arame, os resultados não apresentaram variações significantes. Para a condição de maior velocidade, todas os resultados apresentaram menor reforço quando comparados aos da alimentação convencional, enquanto para a velocidade de arame intermediária, o aumento da frequência tendeu a aumentar o reforço do cordão para as três amplitudes avaliadas.

Pigozzo et al. [62], obtiveram resultados similares aos apresentados acima num estudo comparativo entre alimentação convencional e dinâmica aplicado a procedimentos de revestimento. Nesse trabalho, os autores afirmam que a alimentação dinâmica contribui para a redução da largura e da penetração, e no aumento do reforço, visto que o movimento de recuo do arame tende a puxar a poça de fusão para cima devido à tensão superficial. Em ensaios de sobreposição, o percentual de ferro na superfície dos cordões foi menor para as amostras realizadas com alimentação dinâmica, resultado de uma menor diluição dos cordões. Rosa et al. [63], em um estudo utilizando o processo plasma com alimentação de arame, também obtiveram menor diluição com alimentação dinâmica. Esses autores observaram que para alimentação convencional a diluição foi de aproximadamente 35 %, enquanto a alimentação dinâmica apresentou uma diluição de 21 %.

Com referência à aspectos microestruturais, Riffel et al. [60] mostraram que os ensaios utilizando a alimentação dinâmica de arame em 18 Hz apresentou melhor dispersão de precipitados, resultando numa microestrutura isoentrópica (Figura 21). Além disso, esses autores afirmam que a maior frequência de oscilação induziu ao

refino de grãos, resultado este que contribuiu para o aumento da resistência à corrosão.

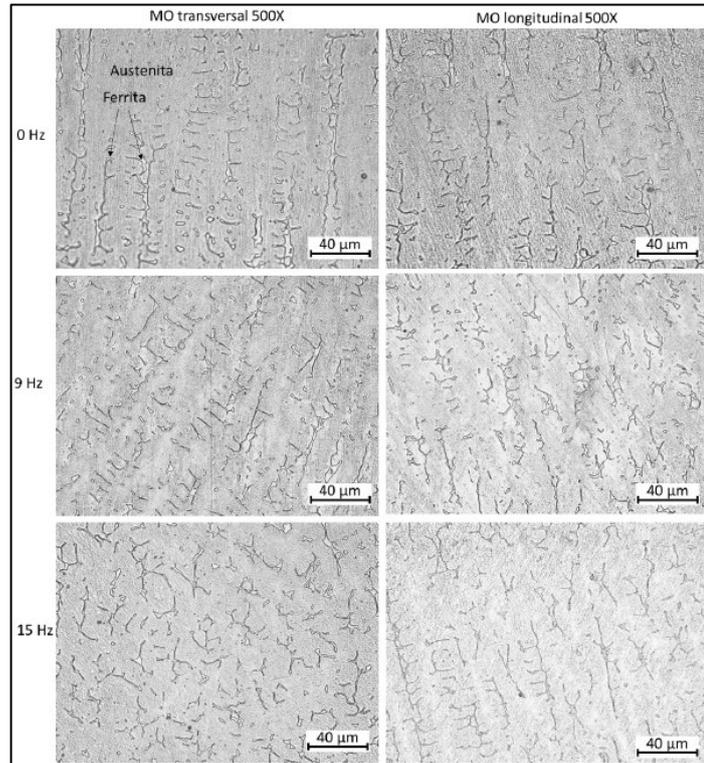
Figura 21 – Dispersão de precipitados para as diferentes condições de oscilação do arame. da esquerda para a direita: 0, 5 e 18 Hz.



Fonte: adaptado de Riffel et al.[60]

Dorneles [11], em procedimentos de manufatura aditiva de aço inoxidável 309L com processo plasma mostra que a fase ferrítica apresentou dendritas mais curtas e dispersas quando a alimentação dinâmica foi aplicada (Figura 22). A autora sugere que este resultado se dá devido à elevada agitação da poça que acaba alterando o fluxo de calor, reduzindo a formação de grandes estruturas colunares, resultando em grão menores.

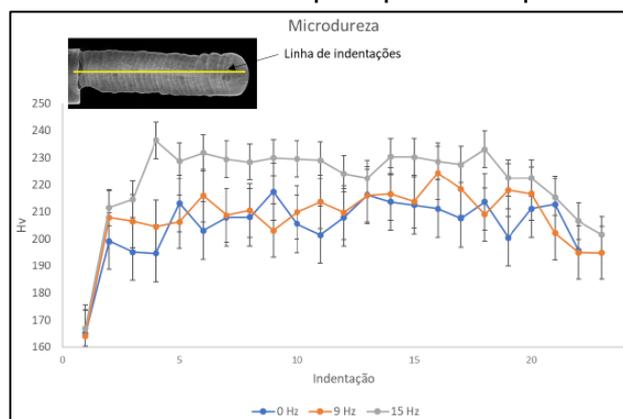
Figura 22 - Microestrutura do centro das paredes realizadas com o processo plasma e alimentação dinâmica de arame de inox 309 L.



Fonte: Dorneles [11].

Além da microestrutura, Dorneles [11] realizou medições de microdureza nas paredes feitas por manufatura aditiva pelo processo plasma e constatou que para a frequência de oscilação de arame de 15 Hz, a microdureza foi maior quando comprada àquela obtida com alimentação convencional (Figura 23). Nesta frequência, a dureza média da parede foi de 224 HV, enquanto para 9 Hz e 0 Hz foi de 207 E 210 Hv respectivamente.

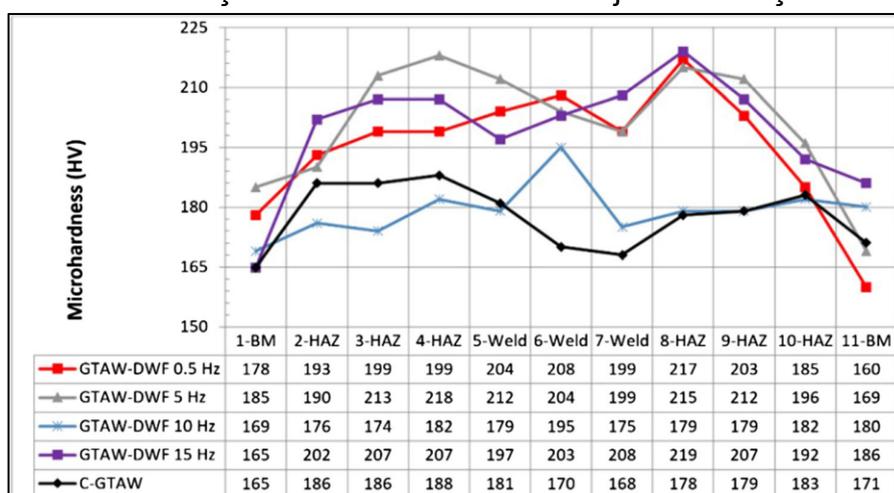
Figura 23 – Valores de medições de microdureza em paredes feita por manufatura aditiva de inox 309 L pelo processo plasma.



Fonte: adaptado de Dorneles [11].

Outro estudo que aborda aspectos da microestrutura foi desenvolvido por Nasareno et al [64]. Neste trabalho, os autores avaliam os efeitos da alimentação dinâmica sobre a microdureza e resistência à fadiga de juntas soldada de aço ASTM A516-70. Os resultados obtidos por esses autores mostram que a microdureza foi maior para ensaios utilizando alimentação dinâmica (Figura 24). Segundo os autores, os maiores valores de dureza podem estar relacionados com maior diluição de Mn (Manganês) no metal de solda provocados pela alimentação dinâmica.

Figura 24 – Perfil de microdureza de ensaios realizado com alimentação convencional e alimentação dinâmica de arame em juntas de aço ASTM A516-70.



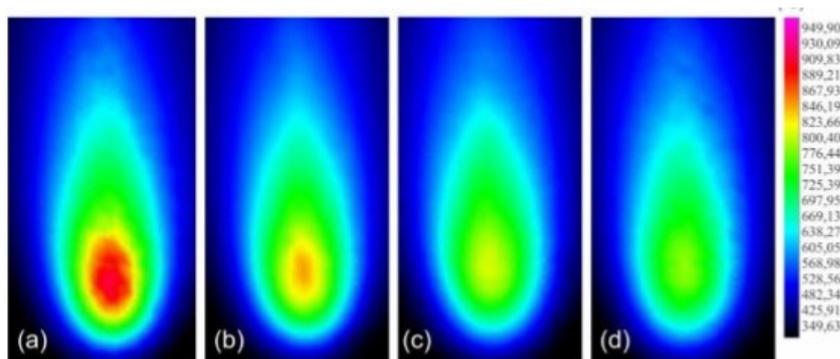
Fonte: Nasareno et al [64].

Além da microdureza, esses autores avaliaram o espaçamento interdentrítico e os resultados mostraram que os ensaios com alimentação dinâmica apresentaram menor espaçamento, sendo o menor para frequência de oscilação de 10 Hz. Segundo

os autores, o refino na microestrutura, sobretudo da zona afetada pelo calor, pode ser um dos fatores que levaram ao aumento da resistência à fadiga.

Além de aspectos macro e microestruturais, alguns autores se propuseram a aplicar termografia infravermelho para avaliar as influências da alimentação dinâmica de arame sobre a temperatura da poça. Paes [7], na soldagem de passe de raiz, realizou a medição por trás da peça e avaliou a perfil térmico do cordão de solda para diferentes condições de soldagem. Figura 25 mostra que a alimentação dinâmica oscilante altera o perfil térmico da poça de fusão, sendo que temperaturas menores foram atingidas para a condição de 2 Hz na oscilação do arame. Silva et al. [46] atribuíram este comportamento ao fato de que o arame resfria ao sair do arco elétrico, logo, quando entra em contato com a poça metálica, acaba por retirar mais calor da mesma até que atinja o equilíbrio térmico. Vale ressaltar que as frequências de oscilação do arame foram de 1 e 2 Hz.

Figura 25 - Imagem termográfica pelo verso da chapa: (a) processo autógeno; (b) processo com alimentação contínua; (c) processo com alimentação dinâmica e frequência de 1 Hz; (d) processo com alimentação dinâmica e frequência 2 Hz.

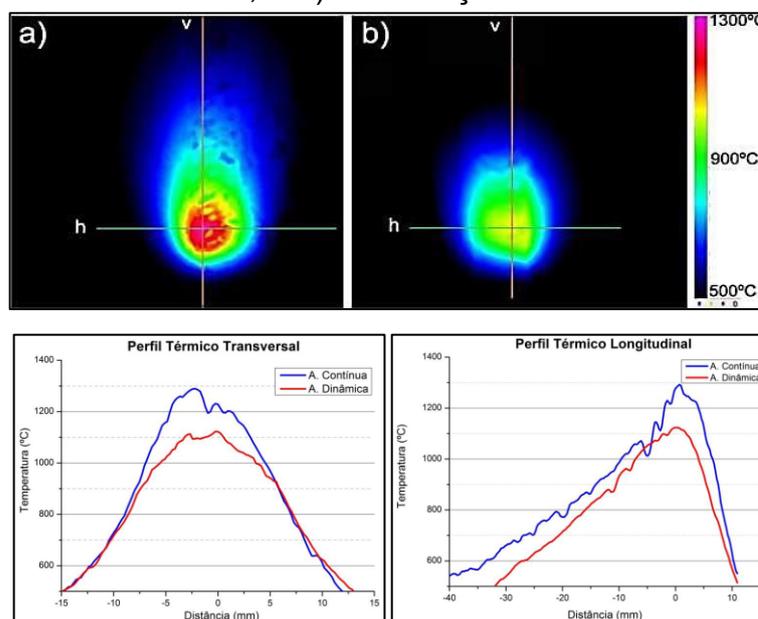


Fonte: adaptado de Paes [7].

Este mesmo comportamento foi identificado por e Riffel [9] quando comparou alimentação dinâmica a 18 Hz e alimentação constante de arame na soldagem interna de tubos cladeados de juntas chanfradas em V. Esse autor cita que a diferença de temperatura entre os dois modos foi da ordem de 200°C na região central do cordão, sendo mais baixa para alimentação dinâmica de material (Figura 26). Vale notar que no perfil transversal, uma vez que a junta era em chanfro V, a diferença de temperatura nos flancos do cordão era bastante pequena. Já no perfil longitudinal, a diferença de temperatura sem mantém ao longo do cordão. Esse autor atribui a redução de

temperatura da poça a dois fatores: à entrada do arame solido/frio à poça de fusão, conforme já comentado anteriormente, e ao aumento das trocas convectivas na poça de fusão, forçadas pela agitação da mesma.

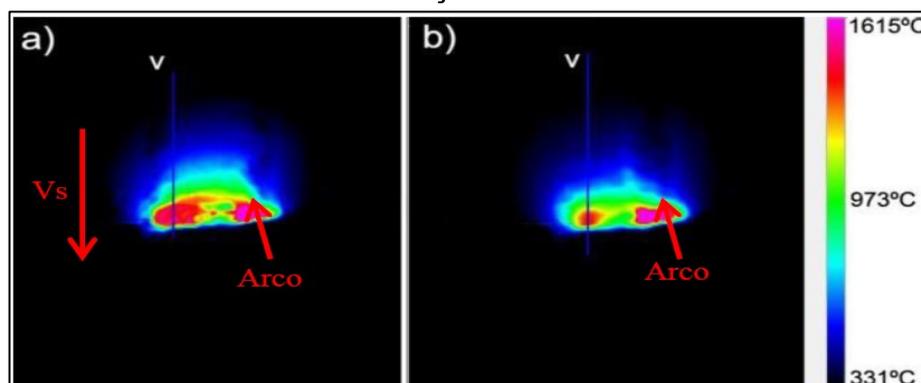
Figura 26 - Perfil térmico de temperatura para soldagem com a) alimentação contínua de arame, e B) alimentação dinâmica de arame.



Fonte: Adaptado de Riffel [9].

Riffel [9] aplicou também uma metodologia para a medição de temperatura apontando a câmera infravermelho diretamente ao cordão de solda para investigar a temperatura no passe de acabamento da junta chanfrada. Devido à elevada amplitude de tecimento aplicada (10 mm), o autor pôde comparar a temperatura na extremidade oposta à qual o arco elétrico se encontrava. Os resultados são mostrados na Figura 27. Assim como a filmagem realizada pelo lado posterior do cordão, o autor conferiu uma redução na temperatura para o procedimento com alimentação dinâmica de material.

Figura 27 - Espectro termográfico da superfície da poça. a) Alimentação contínua; b) Alimentação dinâmica.



Fonte: Adaptado de Riffel [9].

Embora o perfil com menor temperatura tenha sido observado em ambos os trabalhos citados, os autores sugerem apenas hipóteses quanto aos mecanismos físicos que incumbiram neste comportamento. Além disso, não foram realizadas uma série de ensaios que assegure, estatisticamente, a repetitividade deste comportamento.

3.4 Transferência metálica no processo TIG

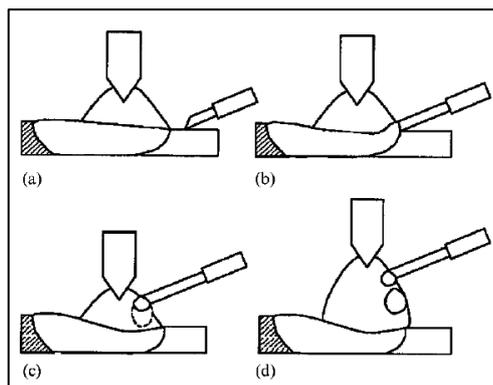
Uma vez que há alimentação de material no processo TIG, o entendimento e controle dos eventos referente à transferência metálica torna-se fundamental na garantia da estabilidade, qualidade e robustez do processo em si, além das características macro e microestruturais dos cordões. Conforme já mencionado nas seções anteriores, embora haja independência entre os ajustes de parâmetros elétricos e parâmetros de adição de material, cada configuração pode induzir a diferentes modos de transferência metálica dentro do processo. Neste sentido, Silva [65] afirma que o modo de transferência metálica influi diretamente na eficiência de deposição, na qualidade estética e estrutural da junta, na geometria da solda, nas formas pelas quais cada operação pode ser realizada, no aporte térmico ao material de base, entre outros aspectos relacionados.

No contexto do processo TIG, ainda na década de 1970, Taguchi et al. [66, 67] apud Ríos et al. [68] caracterizaram quatro diferentes modos de transferência metálica baseado nos tempos de formação da gota e duração da ponte metálica, chamados de TM1 (do inglês, *transfer mode 1*), TM2, TM3 e TM4 respectivamente. O primeiro caso, onde o tempo de contato (T_c) é muito superior ao tempo de crescimento

da gota (T_g), caracteriza o contato “permanente” do arame com a poça metálica, podendo ocorrer alguns destacamentos ocasionais. Já no segundo modo, o tempo de contato é aproximadamente igual ao tempo de crescimento da gota ($T_c \approx T_g$) enquanto o modo TM3 o tempo de contato é muito inferior ao de crescimento da gota, e induz a formação de uma gota grosseira na ponta do arame. O quarto modo é caracterizado pelo não contato do arame com a poça ($T_c = 0$) e, segundo esses autores, é praticamente impossível de acontecer para a maioria dos procedimentos TIG ou plasma.

Mais recentemente, Yudodibroto et al. [69] descreveram quatro modos de transferência metálica com base apenas na variação da DEA (Figura 28). Quando o arame é direcionado muito para baixo (maior DEA), o contato ocorre primeiro com a peça e depois com a poça de fusão, promovendo a transferência intermitente, porém não controlada, logo deve ser evitada. Na Figura 28.b, quando o arame é inserido um pouco mais acima (menor DEA), estabelecendo a ponte metálica, a transferência ocorre, segundo esses autores, em ponte contínua (*uninterrupted bridging transfer*), de maneira suave e não há perturbações na poça de fusão. Este modo de transferência é análogo ao modo TM1 sugerido por Tagushi et al. [66, 67]. Já para posições cuja DEA é um pouco menor, a transferência intermitente prevalece. Os autores denominam este modo de transferência metálica como “transferência em ponte interrompida” (*interrupted bridging transfer*) e seria equivalente ao modo TM2 apresentado anteriormente. Quando a posição de inserção do arame é muito próxima do eletrodo, a formação da gota na ponta do arame é acentuada. Neste modo, os autores afirmam que a gota se destaca por ação da gravidade e a transferência ocorre em voo livre (*free flight transfer*), porém é uma situação bastante instável e favorável a contaminação do eletrodo, sobretudo fora de posição. Neste estudo, os autores monitoraram o perfil de penetração a partir da oscilação da superfície da poça de fusão, e afirma que a transferência em ponte contínua permite um melhor controle do processo visto a redução da agitação da poça de fusão.

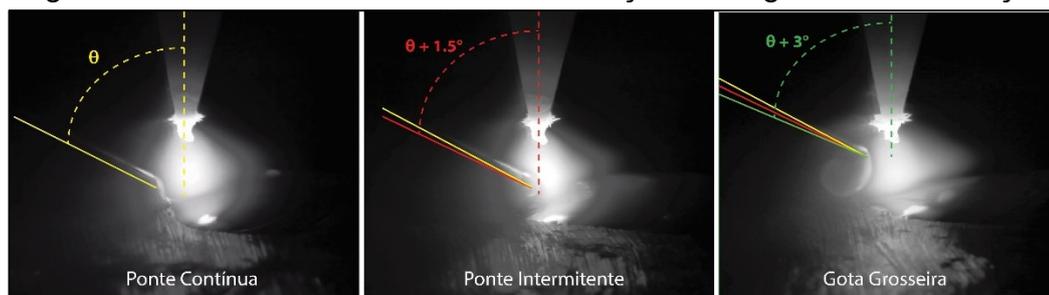
Figura 28 – Modos de transferência metálica no processo TIG.



Fonte: Yudodibroto et al. [69].

Em concordância com os modos apresentados por Yudodibroto et al. [69], Pigozzo [6] mostrou que pequenas alterações no ângulo de alimentação aproximam o arame do eletrodo, encurtando a DEA, alterando completamente o modo de transferência. Segundo o autor, uma variação da ordem de $1,5^\circ$ pode alterar do modo em ponte contínua para ponte intermitente e que 3° já é o suficiente para promover a formação de gotas grosseiras (Figura 29).

Figura 29 – Transferência metálica em função do ângulo de alimentação

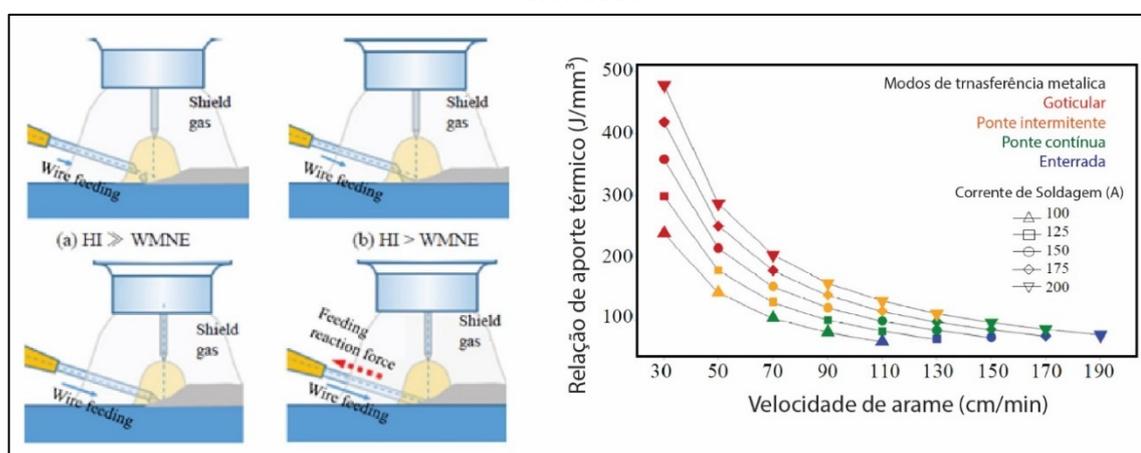


Fonte: Adaptado de Pigozzo [6]

Ainda sobre os modos de transferência metálica, Park et al. [70] sugerem uma relação entre a potência do arco e volume de material depositado, definindo então uma “relação de aporte térmico” (HIR, do inglês *heat input ratio* - J/mm^3), sendo uma função entre as variáveis elétricas, velocidade do arame e velocidade de soldagem. A fim de definir os modos de transferência metálica, os autores variaram a HIR em função da velocidade de alimentação de arame e definiram as zonas onde cada modo de transferência metálica era estabelecido. Na Figura 30a, define-se como transferência em gotas (*drop transfer*) quando a energia necessária para fusão do arame (do inglês *wire melting need energy*) é muito menor do que o aporte de energia do arco (HI – do inglês, *heat input*), e, neste caso, a fusão do arame acontece nas

extremidades do arco. No caso “b”, com o aumento da VA a energia necessária para fundir o arame é um pouco maior, entretanto esta ainda é menor do que HI. Neste caso, a transferência acontece no centro da coluna do arco e o material é alimentado à poça de fusão em modo intermitente. Já para o caso “c”, o balanço entre HI e a energia necessária para fusão do arame é “ideal” e a transferência metálica ocorre em ponte contínua. Por fim, no caso de VA elevada (caso “d”), a energia para fusão do arame é maior do que a fornecida pelo arco e, neste caso, ocorrem eventos de colisão do arame solidado com o metal de base o qual os autores chamaram de “*sticking*”, termo também utilizado por Kutelu [71], o qual pode ser traduzido livremente como “perfurante” ou “cravado”. Na Figura 30, o gráfico mostrado à direita correlaciona a variação da de HIR com VA, onde o autor distingui os modos de transferência metálica resultante para cada caso.

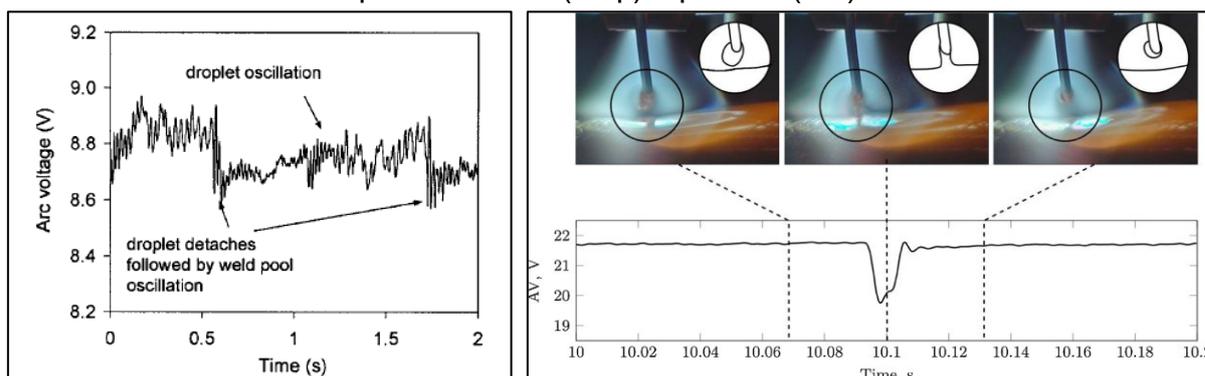
Figura 30 – Modo de transferência metálica para diferentes relações de aporte térmico.



Fonte: Adaptado de Park et al. [70]

Dentre as maneiras de monitorar a transferência metálica no processo TIG, a mais comum, entre os trabalhos disponíveis na literatura, é por meio da aquisição dos sinais elétricos, sobretudo tensão do arco. Yudodibrotto et al. [69] mostram como a tensão do arco se comporta nos momentos que há o destacamento de gota. Conforme pode ser visto na Figura 31 à esquerda, no momento da transferência da gota à poça de fusão, a tensão do arco sofre uma pequena queda. Silva et al [36] pontuam que a redução da tensão do arco é resultado do encurtamento do arco devido ao ancoramento sobre o arame, o qual está mais próximo do eletrodo que a peça. Este mesmo evento também foi observado por [6, 45, 72–74].

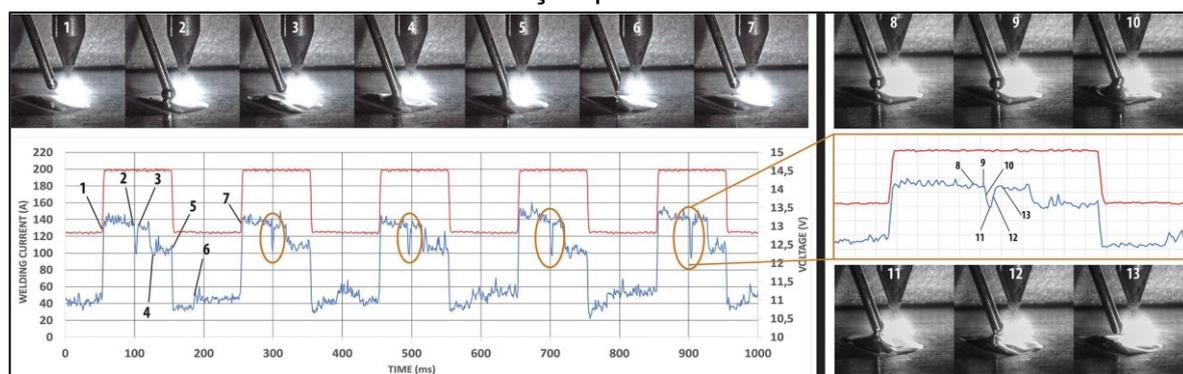
Figura 31 – Variação da tensão do arco no momento de destacamento de gota no processo TIG (esq.) e plasma (dir.).



Fonte: Yudodibrotto et al. [69] (esq.) e Ríos et al. [68] (dir.).

Pigozzo et al. [33], num estudo sobre a transferência metálica no processo TIG com corrente pulsada e alimentação dinâmica pulsada, observaram como a tensão do arco varia nos momentos de estabelecimento de ponte metálica e no destacamento rápido de gotas. Neste estudo, a alimentação de arame foi feita apenas durante o período de pulso. Conforme pode ser visto na Figura 32, a gota formada no período de base anterior ao avanço do arame é destacada rapidamente (pontos 2 e 3). Segundo os autores, a transferência da gota leva em torno de 3 ms, e posteriormente a ponte metálica é estabelecida (ponto 4), e perdura por 72 ms, até o ponto 6 destacado na figura. O estabelecimento da ponte metálica pode ser notado com a queda e aumento da tensão do arco no momento de contato e ruptura respectivamente (pontos 4 e 6).

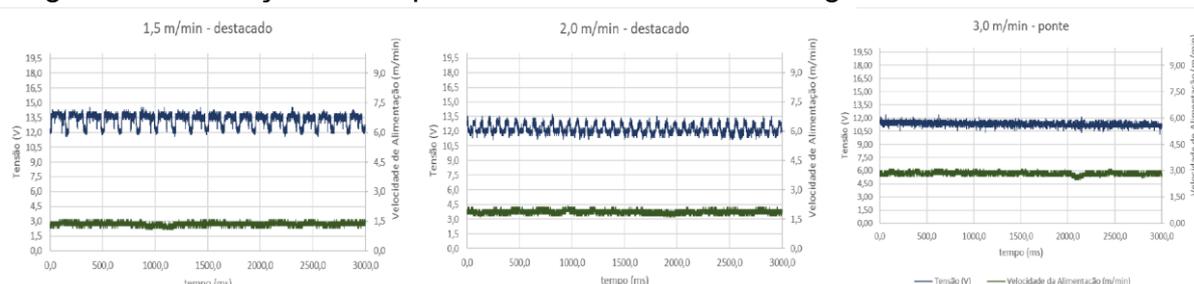
Figura 32 – Oscilograma de tensão do arco e corrente para processo TIG pulsado com alimentação pulsada de arame.



Fonte: Pigozzo et al. [33]

Ainda sobre o monitoramento da transferência por meio da tensão do arco, Rosa et al. [58] mostram como a frequência de destacamento de gota varia com o aumento da velocidade de arame, até que se atinja uma condição de ponte contínua, onde o balanço entre taxa de fusão e taxa de alimentação atinge o equilíbrio. Na Figura 33 é possível observar que a frequência de oscilação do sinal de tensão do arco (azul) é maior para a VA de 2,0 m/min do que para 1,5 m/min. Já para a VA de 3,0 m/min o modo de transferência é em ponte contínua e o sinal de tensão é estável.

Figura 33 – variação da frequência de destacamento de gota com aumento da VA.



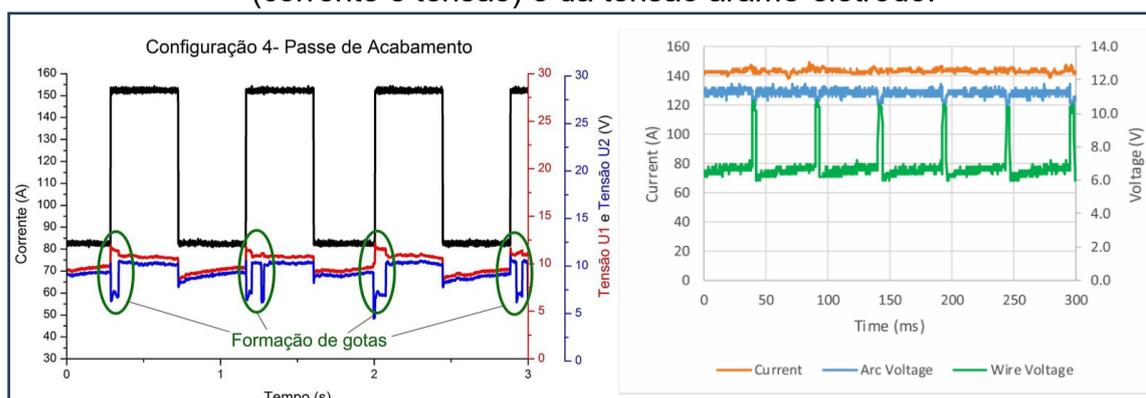
Fonte: adaptado de Rosa et al. [58]

Rios et al. [68] pontuam que utilizar a tensão do arco como sinal de referência para monitorar a transferência metálica é muito mais simples do que medir a resistência / tensão no arame, visto que não há a necessidade de um circuito elétrico adicional, embora este método fora utilizado por alguns autores [41, 75, 76] e também para o controle da alimentação no processo *Dynamic Wire* da Fronius [42]. Neste caso, quando o arame entra em contato com a peça, estabelece-se um curto-circuito, que é detectável no sinal monitorado.

Por outro lado, Riffel [9] propõe o monitoramento da transferência metálica por meio da tensão entre o arame e o eletrodo sem a necessidade de um circuito elétrico externo. Este mesmo método fora utilizado por Silva et al. [36]. Esses autores pontuam que a tensão do arame se aproxima da tensão do arco uma vez que o material de adição se encontra no mesmo potencial que a peça. Nos oscilogramas apresentados na Figura 34 à esquerda, o autor destaca os momentos de e ruptura da ponte metálica. Neste caso nota-se que no início de pulso, a tensão entre arame eletrodo (azul), a qual estava próxima ao valor de tensão do arco (vermelho), sofre uma queda abrupta, caracterizando o rompimento da ponte metálica. Embora neste trabalho o autor não discorra sobre o método de monitoramento, tão pouco se aprofunda sobre a transferência metálica no processo com corrente pulsada, é colocado que a formação

de gotas no início dos períodos de pulso favorece o risco de contaminação do eletrodo, sobretudo em procedimentos fora de posição. Já o gráfico à esquerda da Figura 34, nota-se que a tensão do arame (verde) apresenta picos de curta duração com valores próximos à tensão do arco (azul). Neste caso, a transferência metálica estava em modo intermitente, e cada pico da tensão do arame representa a transferência de uma gota.

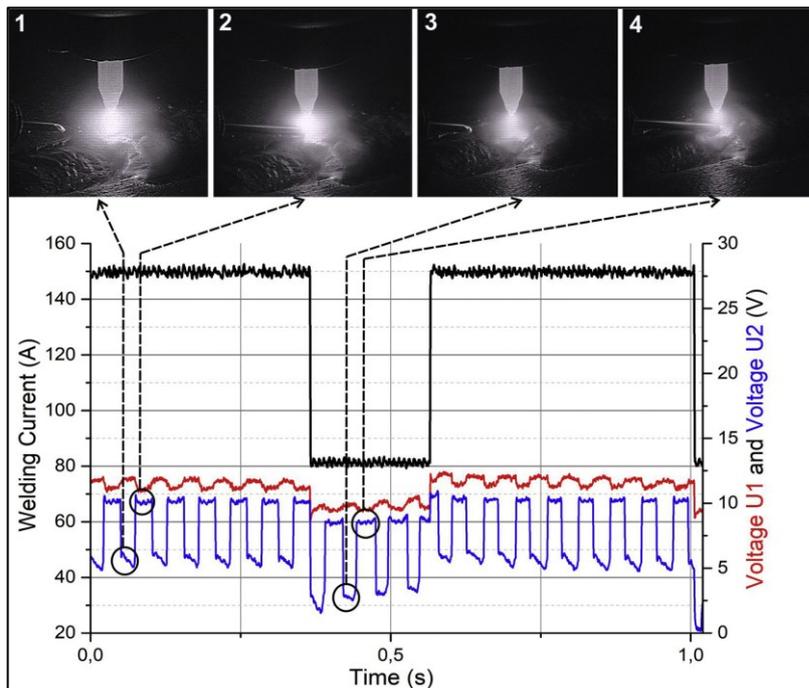
Figura 34 – Oscilogramas de monitoramento dos parâmetros elétricos do arco (corrente e tensão) e da tensão arame-eletrodo.



Fonte: adaptado de Riffel [9] (esq.) e Silva et al. [36]

Uma solução apresentada foi a alimentação dinâmica de arame em corrente pulsada (Figura 34). O autor afirma que o volume de gotas transferido com alimentação dinâmica é menor, quando comparada com alimentação convencional, o que levou a um processo mais robusto em operações de soldagem orbital.

Figura 35 – Transferência metálica no processo TIG com corrente pulsada e alimentação dinâmica.



Fonte: Silva et al. [32].

4 MATERIAIS E MÉTODOS

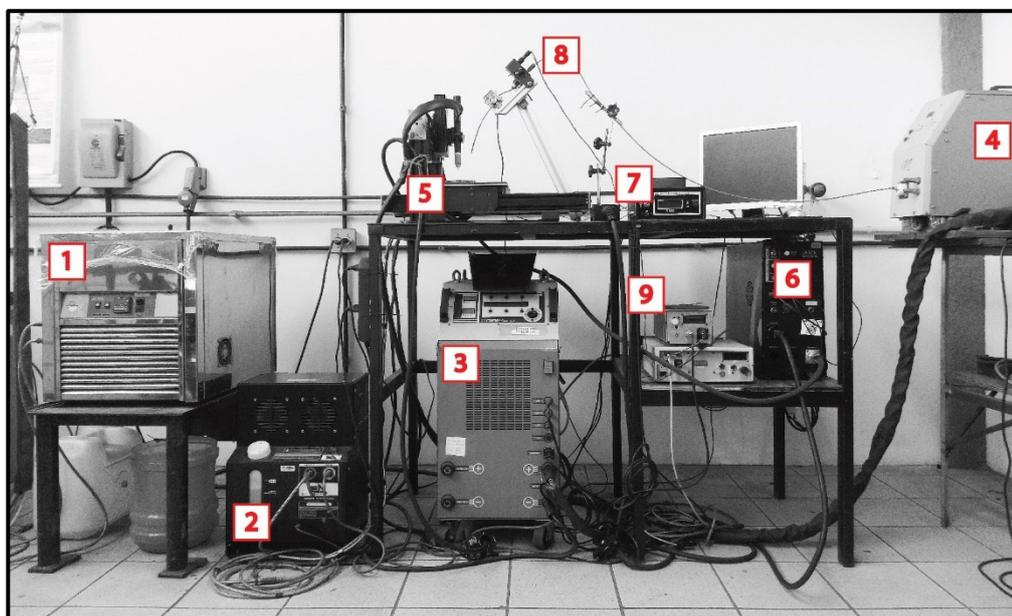
Nesta seção serão descritos todos os materiais e equipamentos utilizados ao longo do trabalho. Vale ressaltar que nem todos os equipamentos foram utilizados em todos os ensaios realizados. Para cada série de experimentos, diferentes métodos e equipamentos foram empregados. Particularidades de cada experimentos também serão detalhadas ao longo da seção.

4.1 Bancada de ensaios

Durante o desenvolvimento da pesquisa, procurou-se manter a configuração de bancada (Figura 36 e Fonte: elaborado pelo autor.

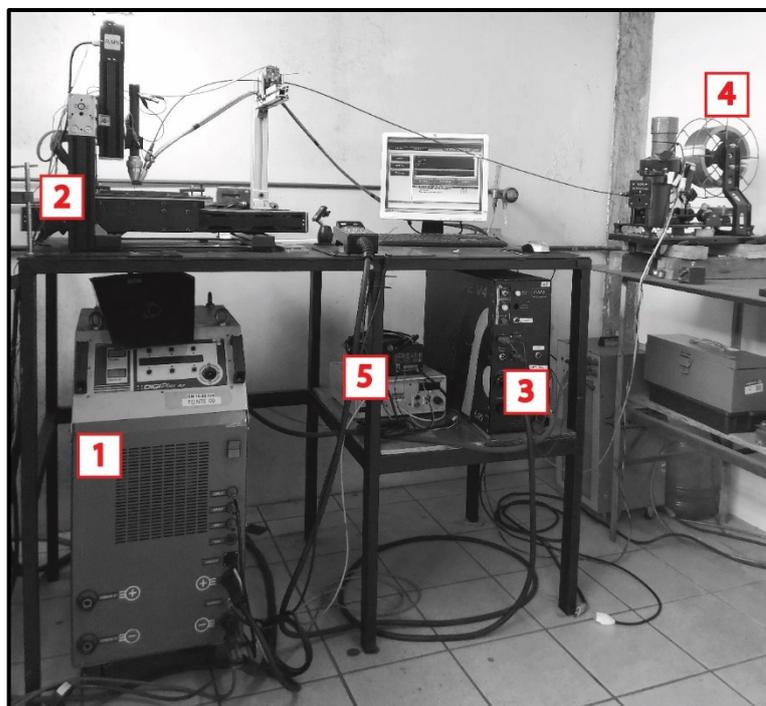
Figura 37) para todos os ensaios. Com exceção do módulo de oscilação do arame, os equipamentos utilizados foram os mesmos, sendo que, inicialmente utilizou-se o Módulo de Alimentação Dinâmica (MAD) e posteriormente o Módulo de Oscilação de Conduíte (MOC), os quais serão apresentados na seção 4.7.

Figura 36 – Bancada de ensaios MOC. 1) Unidade de refrigeração da base refrigerada. 2) Unidade de refrigeração da tocha e bocal. 3) Fonte de soldagem. 4) Cabeçote alimentador de arame. 5) Sistema Cartesiano de Soldagem - SCS. 6) Unidade de controle do SCS. 7) MVS – Medidor de Variáveis de Soldagem. 8) Modulo de Oscilação de Conduíte – MOC. 9) Unidade de controle do MOC.



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 37 – Bancada de Ensaios MAD. 1) Fonte de Soldagem. 2) SCS. 3) Unidade de controle SCS. 4) Módulo de alimentação dinâmica – MAD. 5) Unidade de controle do MAD.



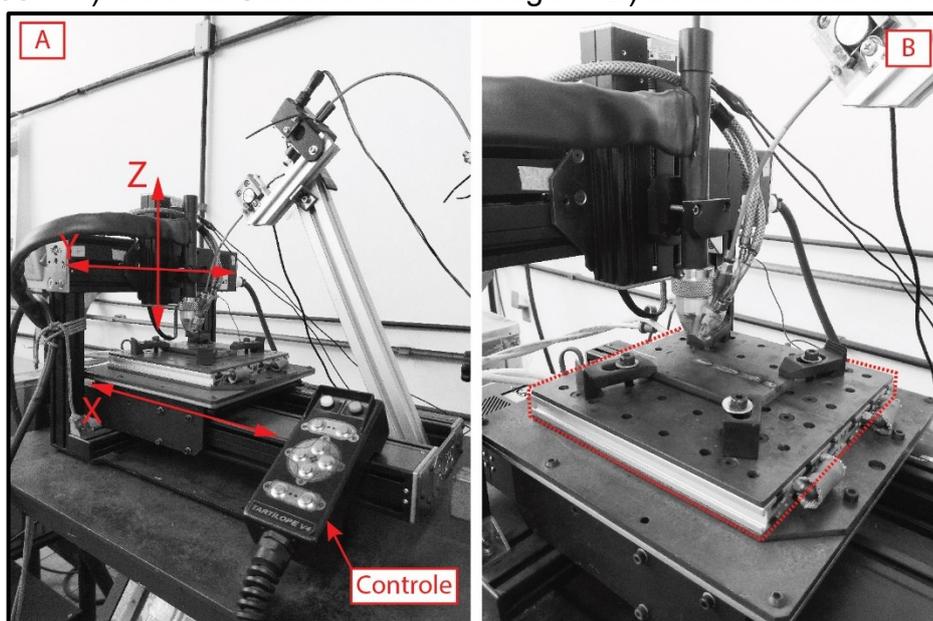
Fonte: elaborado pelo autor.

A fonte de soldagem utilizada foi uma Digiplus A7 AC 450 do fabricante IMC, com capacidade de regulação de correntes de até 400 A. A fonte apresenta dupla saída, o que permite também a configuração em TIG com arame-quente além de corrente pulsada e corrente alternada.

Para deslocamento de tocha e/ou peça, utilizou-se o Sistema Cartesiano de Soldagem (SCS) do fabricante SPS, o qual possui três eixos de movimentação (X, Y e Z) sendo que a tocha se manteve estática, e a peça moveu-se no eixo X. O sistema é operado em código G e possui a regulação de trajetórias lineares, triangulares, trapezoidais já pré-programadas, como também permite a programação de qualquer outra trajetória mais complexa.

Sobre a base X do SCS, fixou-se uma base refrigerada a qual consiste em uma chapa de cobre acoplada a um perfil de alumínio por onde circulou-se água refrigerada. Para melhor troca de calor entre a peça e a base, foram utilizados grampos de fixação conforme mostra a Figura 38.

Figura 38 – A) Sistema Cartesiano de Soldagem. B) Detalhe da base refrigerada.

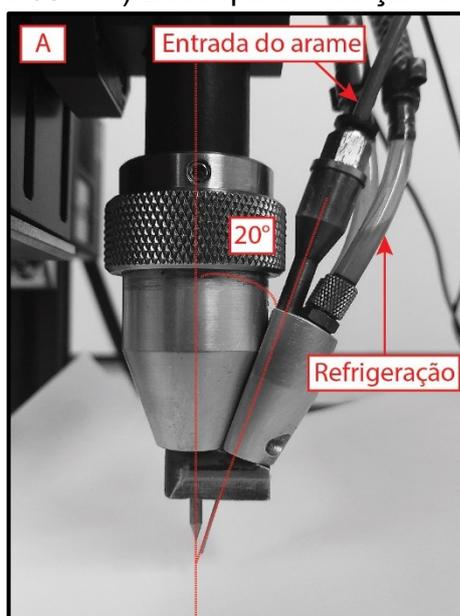


Fonte: elaborado pelo autor.

A unidade de refrigeração para a base refrigerada foi um *chiller* modelo MA-083 da marca Marconi. Já para a refrigeração da tocha e do bocal, utilizou-se uma unidade resfriadora modelo UR-AP da marca Eletroarc.

A tocha de soldagem utilizada em todos os ensaios foi uma AUT-WIG 400W do fabricante Abicor Binzel. A tocha é refrigerada à água e tem capacidade para correntes de até 400A em corrente contínuo, ou 280A em corrente alternada. Na tocha, foi acoplado um bocal (desenvolvido no LABSOLDA) para alimentação de arame com ângulo de 20° em relação ao eixo do eletrodo, configurando a inserção de topo paralelo à face do cone do eletrodo, analogamente ao processo TOPTIG comentado na seção 3.2.2.

Figura 39 – A) Bocal para inserção de topo.



Fonte: elaborado pelo autor.

A aquisição de dados foi realizada por meio do Medidor de Variáveis de Soldagem (MVS) do fabricante SPS. Maiores detalhes sobre o equipamento serão descritos na seção 0.

4.2 Equipamentos para filmagem em alta velocidade e fotografia

No desenvolvimento da pesquisa, equipamentos para filmagem em alta velocidade e fotografia foram utilizados na geração de imagens para melhor compreender os fenômenos físicos presentes no processo.

O *setup* de filmagem em alta velocidade consistia em duas câmeras, modelos MotionPro Y4-S2 da marca IDT e Fastcam NOVA S9 da marca Photron (Figura 40). O primeiro modelo permite filmagens em sua maior resolução (1024x1024 pixel) a uma taxa de 4500 fps (quadros por segundo, do inglês, *frames per second*). Já o segundo, para a mesma resolução, a máxima taxa de aquisição é de 9000 fps.

Figura 40 – Câmeras de filmagem em alta velocidade. Esq) IDT MotionPro Y4-S2. Dir) Photron Fastcam NOVA S9.



Fonte: websites dos fabricantes (<https://idtvision.com>; <https://photron.com>).

Ambas as câmeras foram equipadas com uma lente modelo EF 180mm f/3.5 USM Macro da marca Canon (Figura 41 B), com a possibilidade de ter a distância focal estendida à 360 mm por meio de um duplicador Canon EF 2X iii Extender (Figura 41 C).

Além das câmeras de alta velocidade, tem-se à disposição uma câmera DSLR (do inglês, *Digital Single Lens Reflex*) modelo 60D da marca Canon (Figura 41 A), a qual foi utilizada para análise das macrografias, fotos e vídeos dos experimentos em bancada.

Figura 41 – A) Câmera DSLR Canon 60D. B) Lente Canon EF 180mm USM Macro. C) Canon EF 2X iii Extender.



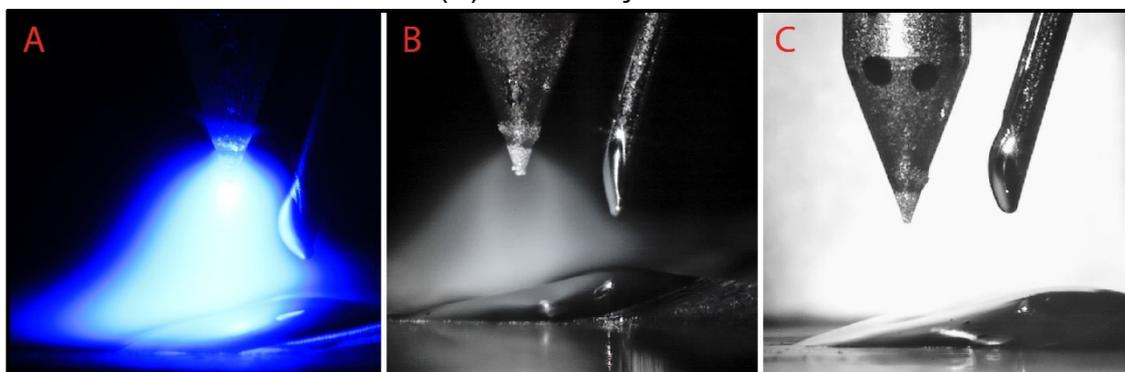
Fonte: site do fabricante (<https://global.canon/>)

Nos experimentos para validação do sistema de medição de velocidade de alimentação de arame (seção 4.6.1), as câmeras foram utilizadas juntas com disparos sincronizados, o que permitiu a filmagem de dois eventos distintos que aconteciam simultaneamente. Já nas filmagens de ensaios de soldagem apenas uma das câmeras foi empregada.

Para a supressão do arco elétrico nas filmagens em alta velocidade, fez-se o uso de um sistema de iluminação LASER sincronizado com a taxa de quadros das

câmeras. O equipamento disponível foi o modelo Cavilux HF da marca Cavitar, com potência de pulso de 500W. Trata-se de um LASER classe 4 com comprimento de onda de 810 ± 10 nm. Associado ao uso de um filtro óptico tipo passa-banda de $810 +3,0/-1,0$ nm, mesmo comprimento de onda que o LASER, para que os demais comprimentos de onda emitidos pelo arco elétrico sejam filtrados, é possível reduzir a intensidade do luminosa o arco da imagem e melhor visualizar os fenômenos ligados a transferência metálica. A Figura 42 mostra o resultado da imagem sem iluminação LASER (A), com iluminação LASER desfocada (B) e com iluminação LASER focado (C). O filtro óptico utilizado foi o Edmund TECHSPEC 810 ± 2 nm. Embora na Figura 42A não houvesse iluminação com o LASER, foi utilizado um filtro passa banda de 470 nm da marca Baader.

Figura 42 – Exemplo de imagem sem iluminação LASER (A), iluminação com LASER desfocado (B) e iluminação com LASER em foco



Fonte: elaborado pelo autor.

4.3 Consumíveis: eletrodo, gás de proteção e metais de adição

Como consumíveis comuns a todos os ensaios, utilizou-se argônio puro (99,99% de pureza) como gás de proteção e o eletrodo de tungstênio foi o Abicor Binzel E3 (W + 1.5% La_2O_3 + 0.08% ZrO_2 + 0.08% Y_2O) de 3,2 mm de diâmetro, afiado em 40° . O ângulo de afiação foi mantido para garantir paralelismo entre o metal de adição o qual foi alimentado com 20° (Figura 39).

Ao longo do trabalho, foram utilizadas duas ligas metálicas como metal de adição. Ensaios de caracterização e análises gerais sobre a alimentação dinâmica foram realizados com arame de aço inoxidável 316LSi de 1,0 mm de diâmetro. Trata-se de uma liga austenítica com baixo teor de carbono. A liga apresenta boa

soldabilidade e elevada resistência à corrosão, sendo amplamente utilizada nas indústrias petroquímica e alimentícia, dentre outras. A seleção da liga se deu pelo fato de que um dos principais objetivos de estudo seriam a aplicação da alimentação dinâmica em procedimentos de revestimento por soldagem. A composição química do arame utilizado é mostrada na Tabela 1.

Tabela 1 – Composição química do arame de 316LSi – 1,0 mm

	C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	P	S	Cu
% em massa	0,03 máx.	23,0 – 25,0	12,0 – 14,0	0,75 máx.	1,0 – 2,5	0,65 – 1,00	0,03 máx.	0,03 máx.	0,75 máx.

Fonte: certificado fornecido pelo fabricante.

Também foram realizados ensaios de revestimento duro (hardfacing) com arame tubular de base ferro com carbeto de tungstênio. Para tanto, utilizou-se o arame da liga comercial CORODUR AO-Br, do fabricante Durum do Brasil (DIN 8555 MF 21/22 - UM - 60 – CG) com diâmetro de 1,6 mm. De acordo com o fabricante, o metal de solda (MS) resultante consiste numa matriz Fe-C-W-Co com carbeto de tungstênio dispersos ao longo do cordão e dureza na ordem de 65-70 HRC. A composição do arame utilizado é mostrada na Tabela 2.

Tabela 2 – Composição química do arame CORODUR AO-Br de 1,6 mm.

	Fe	C	Co	W	Mn	P	S	Si	Mg	Ti	Nb	Mo
% em massa	Bal.	2,5 máx.	5,0 máx.	30 máx.	0,2 máx.	0,02 máx.	0,015 máx.	0,2 máx.	0,015 máx.	0,50 máx.	0,40 máx.	0,40 máx.

Fonte: Certificado fornecido pelo fabricante.

Todos os procedimentos de solda foram realizados sobre chapas de aço carbono ASTM A36. Foram utilizadas chapas com espessuras de 4,76 mm (3/16”), 6,00 mm, 9,53 (3/8”) e 12,7 (1/2”) nos diferentes ensaios. A composição química do metal de base utilizado é mostrada na Tabela 3.

Tabela 3 – Composição química das chapas de aço carbono ASTM A36.

	Fe	C	Mn	Si	S	P	Cu	Cr	Ni	Mo
% em massa	Bal.	0,14	0,51	0,17	0,014	0,016	0,10	0,11	0,05	0,012

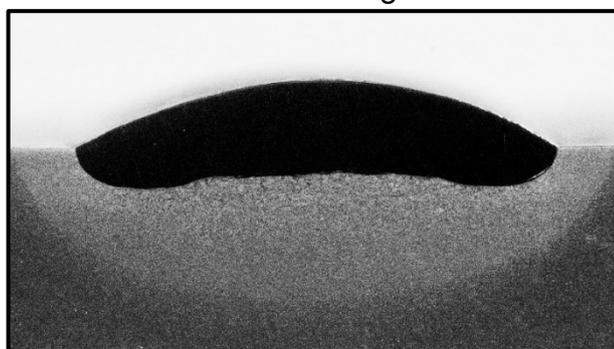
Fonte: certificado fornecido pelo fabricante.

4.4 Ensaios metalográficos

Para as análises metalográficas, o procedimento e preparação das amostras de todos os ensaios foi padrão. A partir dos cortes transversais dos cordões de solda, as amostras foram lixadas com lixas de granulometria 80, 120, 240, 320, 600 e 1200 *mesh*, seguidas de polimento com alumina (Al_2O_3) em suspensão aquosa. Para análise da geometria dos cordões, as amostras de ambos os metais de adição utilizados foram atacadas com a reagente Nital 10% (HNO_3 + álcool etílico).

As seções transversais dos cordões foram fotografadas com a câmera DSLR descrita no item 4.2, com resolução de 5184 x 3456 pixels. As imagens foram processadas no software de tratamento de imagens Adobe Lightroom e a medição das dimensões da altura do reforço, máxima penetração, largura, ângulo de molhamento, diluição e índice de convexidade foi realizada no MATLAB. Vale ressaltar que o índice de convexidade é dado pela razão Reforço/Largura.

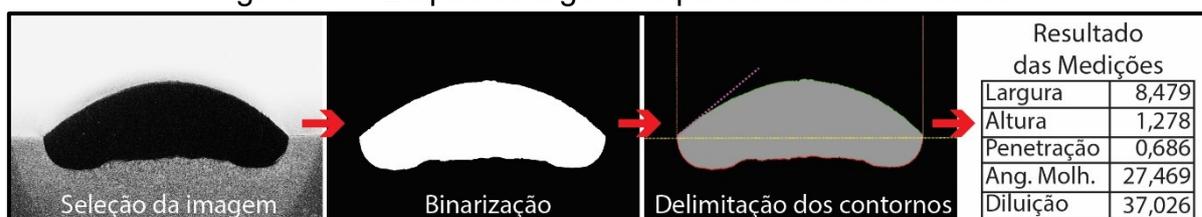
Figura 43 – Exemplo de amostra de aço inoxidável 316 LSi depositado em aço carbono atacada com reagente Nital 10%.



Fonte: elaborado pelo autor.

O algoritmo utilizado para análise da imagem fora desenvolvido por Galeazzi [77] durante sua tese de doutorado, e o processamento segue as seguintes etapas: 1- Seleção da imagem; 2- Binarização da imagem; 3- Delimitação dos contornos; 4- Medição das dimensões com base na escala informada (pixel / mm).

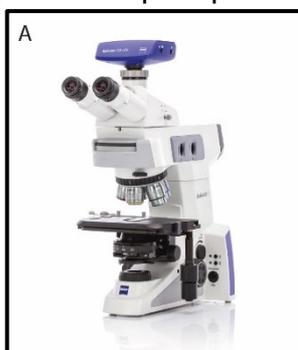
Figura 44 – Etapas do algoritmo para análise de macros.



Fonte: elaborado pelo autor.

Para análise das microestruturas foram utilizados o reagente Marble (4g CuSO_4 + 20ml HCl + 20ml H_2O) nas amostras de 316LSi. As amostras foram observadas por meio do microscópio óptico da Zeiss, modelo Axiolab 5 (Figura 45).

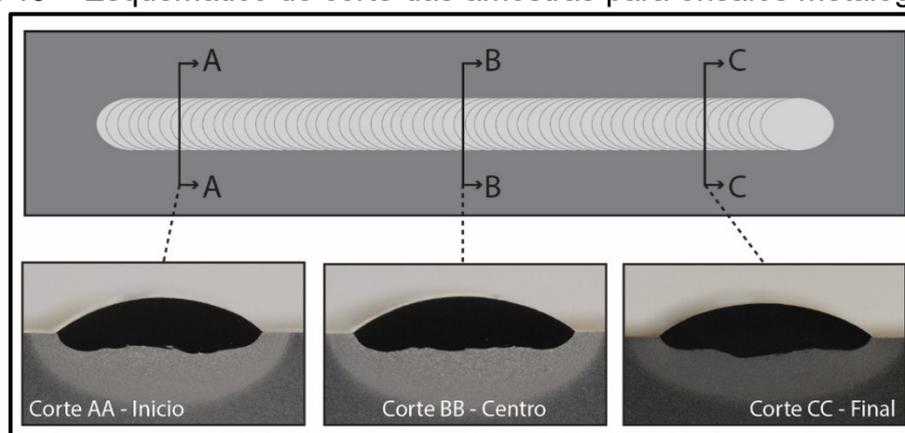
Figura 45 – A) Microscópio óptico Zeiss Axiolab 5.



Fonte: Sites dos fabricantes (<https://www.zeiss.com>)

A fim de obter resultados estatisticamente confiáveis, para cada ensaio de soldagem foram preparadas e analisadas as geometrias de três amostras das seções transversais, distribuídas de acordo com a Figura 46.

Figura 46 – Esquemático de corte das amostras para ensaios metalográficos.



Fonte: elaborado pelo autor.

Para avaliar os efeitos dos parâmetros, sobretudo, da frequência de oscilação do arame sobre a geometria do cordão, dois métodos estatísticos foram utilizados. O primeiro deles foi a Análise da Variância (ANOVA) para avaliar se houve diferença significativa em ao menos uma das médias entre as dimensões medidas. Para tanto, foi levado em consideração o valor- p e, valores menores do 0,05 rejeitam a hipótese nula (H_0 = As médias são iguais), isto é, verifica-se que há uma diferença significativa entre as médias. Já para valores acima de 0,05 aceita-se H_0 .

Além do ANOVA, para avaliar a correlação da frequência de oscilação com a variação da geometria dos cordões, aplicou-se utilizou-se o método estatístico de correlação de Spearman. Este método avalia o nível de correlação monotônica entre duas variáveis, seja linear ou não. Para calcular o coeficiente de correlação de Spearman os valores de cada variável são classificados em ordem crescente e, para cada par de observações, calcula-se a diferença entre os rankings de x e y , indicada por d_i na equação (1). As diferenças são elevadas à segunda potência e somadas. No denominador, procede-se com a normalização do coeficiente, para que o valor do coeficiente de Spearman varie entre -1 e 1. Quanto mais próximo de 1 ou -1 for o coeficiente, mais forte é a correlação entre as variáveis. Por outro lado, quanto mais próximo de zero, menor é o grau de relação.

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n d_i^2}{n(n^2 - 1)} \quad (1)$$

Neste trabalho foram considerados os seguintes graus de correlação a partir dos coeficientes calculados:

- **Forte:** valores maiores que 0,7 (positivos ou negativos), indicam um grau de correlação forte, o que implica que há uma relação monotônica evidente entre as variáveis;

- **Moderado:** valores entre 0,3 e 0,7 (positivos ou negativos), indicam um grau de correlação moderado, o que sugere que há uma relação monotônica entre as variáveis, entretanto, não muito clara e evidente;

- **Fraco:** valores menores que 0,3 (positivos ou negativos), indicam um grau de correlação fraco, isto é, a relação monotônica entre as variáveis é pouco significativa a fim de não fundamentar tendências ou previsões assertivas.

- **Ausência de correlação:** Valores iguais ou muito próximos de zero denotam a ausência de correlação monotônica entre as variáveis.

4.5 Ensaio de microdureza

A análise de microdureza realizada em algumas das series de experimentos foram executadas no microdurômetro modelo VH1001 do fabricante Buehler Wilson. O equipamento medições na escala Vickers com cargas de 0,01 gf (HV0.01) à 2 kgf (HV2).

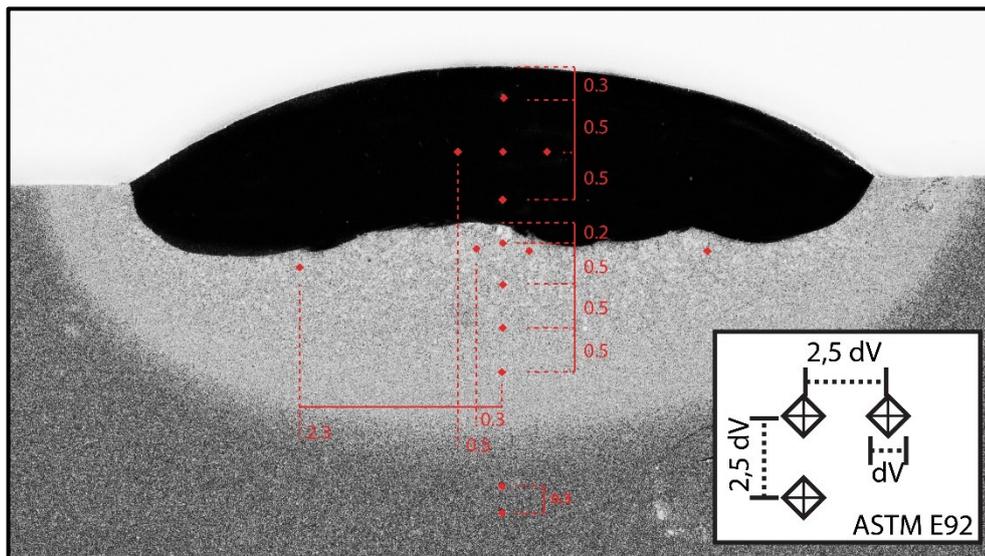
Figura 47 – Microdurômetro Buehler Wilson VH1102



Fonte: Site do fabricante (<https://www.buehler.com>).

Os testes de microdureza foram conduzidos em acordo com a norma ASTM E92, nas seções transversais das amostras conforme mostra a Figura 48. O espaçamento mínimo entre indentações estabelecido na norma foram respeitados e foram realizadas então, cinco medições no metal de solda, cinco na zona afetada pelo calor de grãos grosseiros (ZAC GG), quatro na zona afetada pelo calor de grãos finos (ZAC GF) e duas no metal de base (MB).

Figura 48 – Posição das indentações para teste de microdureza. Espaçamentos em milímetros.

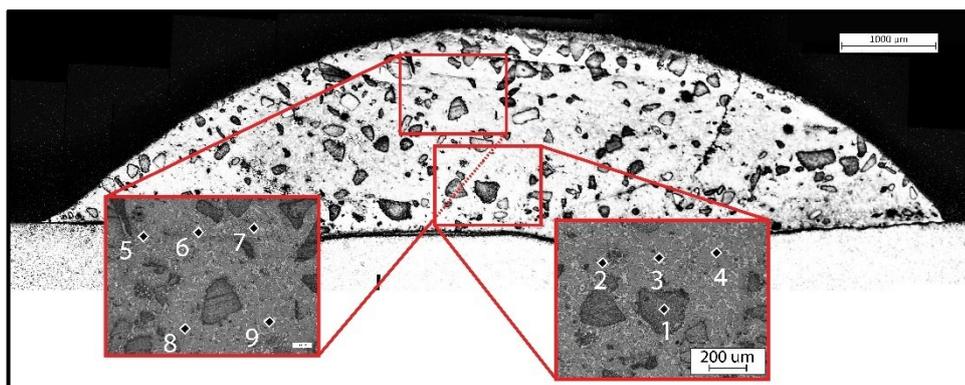


Fonte: elaborado pelo autor.

4.5.1 Teste de microdureza em amostras de revestimento duro (hardfacing)

Nos experimentos de revestimento duro realizados com arames tubulares com carbeto de tungstênio (WC e W_2C), os ensaios de microdureza foram realizados com outra metodologia. Devido à distribuição das partículas de carbeto, não foi possível adotar a distribuição das indentações conforme mostrado na Figura 48. Neste caso, as indentações foram em regiões aleatórias na região central do MS, respeitando o espaçamento entre indentações de acordo com a norma ASTM E92.

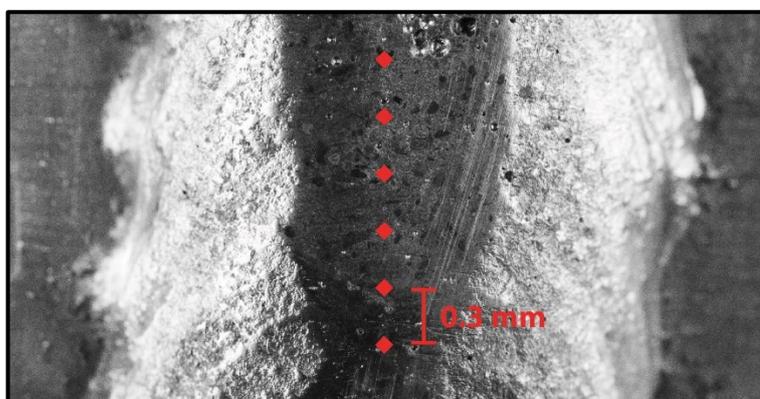
Figura 49 – Indentações para ensaios de microdureza na seção transversal em amostras de revestimento duro.



Fonte: elaborado pelo autor.

Além da seção transversal, foram realizados ensaios de microdureza na superfície do cordão de solda. Para tanto, o topo do cordão foi ligeiramente lixado e polido para garantir uma superfície plana.

Figura 50 - Indentações para ensaios de microdureza na superfície do cordão em amostras de revestimento duro



Fonte: elaborado pelo autor.

4.6 Sistema de aquisição e pós processamento de dados

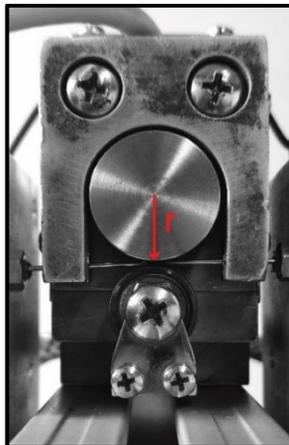
Para monitoramento e análise dos procedimentos executados ao longo do trabalho, foram aquiridos os sinais referentes à corrente do arco (I_{ARC}), tensão do arco (U_{ARC}) e velocidade de arame (VA). Além desses, a leitura do sinal de tensão entre o arame e eletrodo (U_{AE}) foi fundamental para a caracterização e monitoramento do processo. Na seção 4.8 será discutido sobre a importância e o método utilizado na análise a partir da leitura deste sinal de tensão.

A aquisições dos sinais fora feita pelo sistema desenvolvido denominado de Medidor de Variáveis de Soldagem – MVS, da marca SPS. Trata-se de um equipamento customizável de acordo com as demandas e variáveis do processo. Entretanto, as variáveis padrões de medição são: corrente, tensão, velocidade de arame e vazão de gás. Para o presente trabalho, uma vez que MVS possui entradas para módulos adicionais, foi implementado um segundo módulo para a leitura da tensão arame-eletrodo e da corrente de arame-quente, quando necessária, ampliando para 5 canais de entrada de sinais (VA , I_{ARC} , U_{ARC} , U_{AE}). No presente estudo, a vazão de gás não foi monitorada pelo MVS, mas regulada diretamente na saída do cilindro de gás de proteção.

Os sensores de corrente de soldagem e corrente arame quente foram sensores de efeito Hall modelos CYHCS-EKB500A-C da marca Chen-Yang, capazes de medir correntes na ordem de ± 1000 A. Para a leitura da tensão do arco (U_{ARC}), os terminais foram conectados entre a peça e o eletrodo, enquanto para a leitura de U_{AE} , os terminais foram ligados ao arame e ao eletrodo.

Já para a medição da velocidade de arame, utilizou-se um *encoder* modular modelo AMT10X do fabricante CUI INC com resolução de 2048 pulsos por rotação (PPR). O sensor permite configuração para leitura em quadratura, aferindo uma resolução ainda maior. Para o presente trabalho, foi utilizado a máxima resolução do encoder (8192 PPR). Associado ao diâmetro do rolete em contato com o arame (22,4 mm), o sensor configura uma leitura de 0,0086 mm por pulso. Este valor é denominado de Constante de *encoder* (C_{ENC})

Figura 51 - Sensor de velocidade de arame. Raio do rolete (r): 11,2 mm.



Fonte: elaborado pelo autor.

A leitura dos sinais é realizada a uma taxa de aquisição de 10 kHz. Entretanto, a saída de dados pode ser regulada em 0,5, 1, 2, 5 ou 10 kHz. No presente trabalho, devido a máxima frequência de oscilação utilizada ter sido 18 Hz, optou-se por uma taxa de 2 kHz para salvamento de dados, resultando em um intervalo de medição de 0,0005 s.

A saída dos dados do MVS é no formato de planilha em um arquivo do tipo .CSV (*comma separated values*), formato comumente utilizado e compatível com diferentes *softwares* de análise de dados. No presente trabalho, o processamento dos dados foi feito no *software* MATLAB onde foram desenvolvidos algoritmos de análise ciclo a ciclo da transferência metálica, levantando valores médios de cada parâmetro

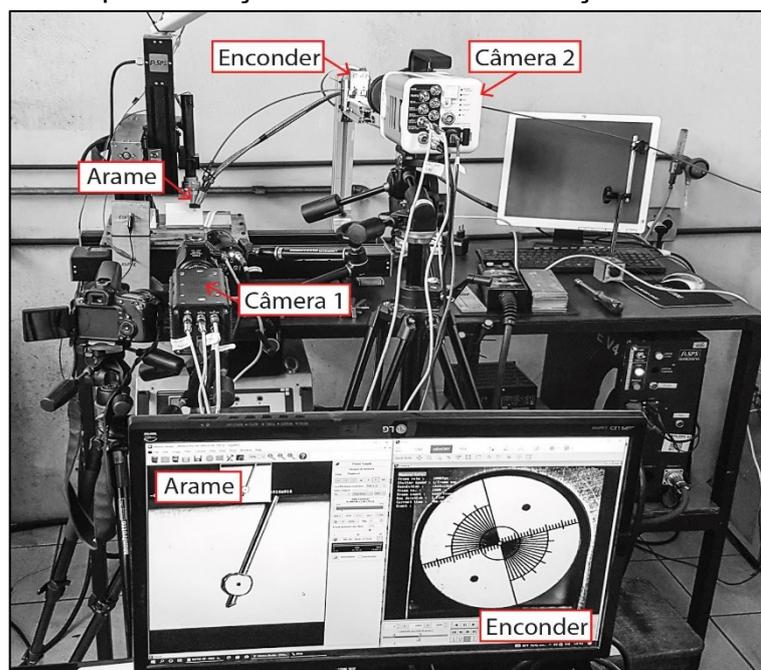
intrínseco ao processo, bem como para caracterizá-lo. Na seção 4.8 será apresentada a metodologia utilizada e quais parâmetros foram definidos para o processo TIG com alimentação dinâmica.

4.6.1 Avaliação do sistema de medição da velocidade de alimentação de arame

De modo a garantir que a velocidade de alimentação de arame (V_a) fosse realizada corretamente, isto é, garantir que leitura coincidissem com as velocidades instantâneas reais da ponta do arame na saída da tocha, foi necessário avaliar e validar o sistema de medição da velocidade. Isto porque, além da disposição do conduíte, a posição em que o *encoder* se encontra, relativo à tocha e ao módulo oscilador, também influencia na dinâmica de oscilação de arame.

Após a definição da disposição dos equipamentos na bancada, foram realizadas filmagens com duas câmeras de alta velocidade sincronizadas. A primeira delas foi direcionada para capturar o movimento do arame na ponta da tocha, enquanto a segunda focou no rolete do *encoder*, conforme mostra Figura 52. Além das filmagens, foi feita a aquisição da velocidade por meio do MVS.

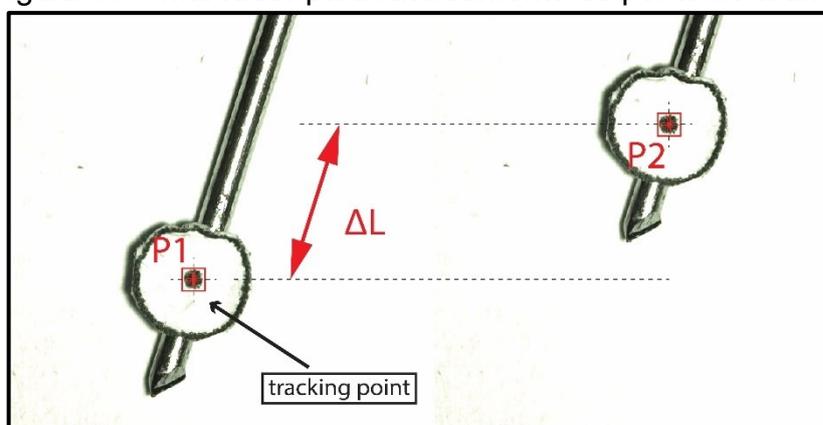
Figura 52 – Bancada para aferição do sistema de medição da velocidade de arame.



Fonte: elaborado pelo autor.

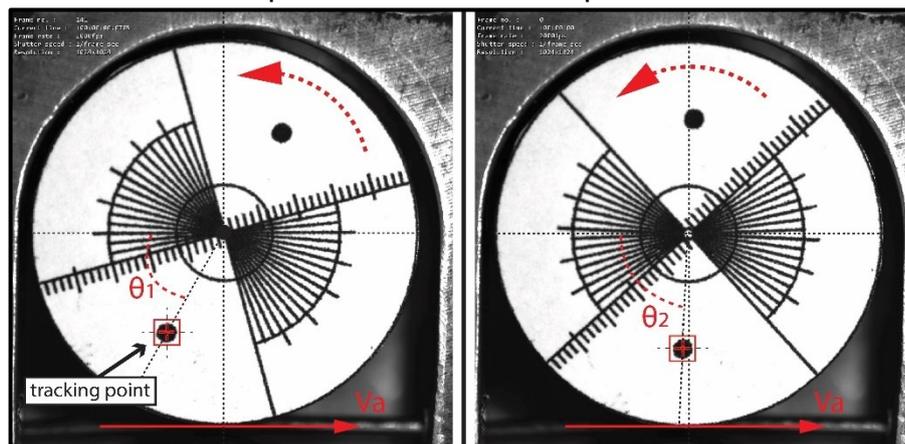
A medição das velocidades da ponta do arame e da rotação do rolete do encoder foram realizadas por meio da ferramenta de rastreamento de ponto (*point tracking*) do software de análise de imagens Motion Studio e pós-tratamento de dados no software MATLAB. Para tanto, foram colados marcadores na ponta do arame (Figura 53) quanto no rolete do sensor (Figura 54).

Figura 53 – Marcador para rastreamento de ponto no arame.



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 54 – Marcador para rastreamento de ponto no rolete do *encoder*.



Fonte: elaborado pelo autor.

A velocidade na ponta do arame foi calculada por meio do deslocamento linear do ponto de rastreamento no tempo. Já no *encoder*, foi encontrada a posição angular do ponto rastreado para então calcular a velocidade angular e, posteriormente, a velocidade linear no raio de contato com o arame.

As posições instantâneas do *tracking point* foram levantados quadro a quadro com uma taxa de 2000 *frames* por segundo. Os dados levantados foram então compilados no MATLAB onde levantou-se as velocidades médias e de pico para

avanço e recuo de cada método de medição. Além disso, foi avaliada a folga entre o condúíte e arame.

Para validar a medição pelo MVS, utilizou-se o método estatístico de análise de variância (ANOVA), comparando os valores aquisitados com os levantados via filmagem em alta velocidade na ponta do arame, o qual, supostamente, apresenta a leitura mais fiel do comportamento do arame na saída da tocha. Para tanto, ambos os testes foram realizados utilizando grau de confiança de 95 % ($\alpha = 0,05$).

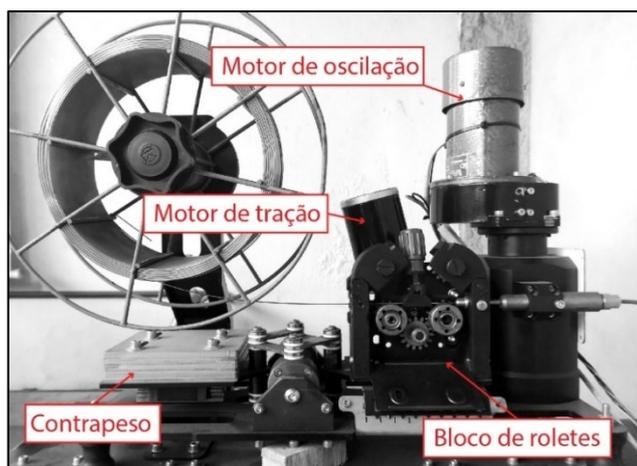
O método ANOVA avalia se diferença entre as médias é estatisticamente significativa. A partir dos *p-values* encontrado, podemos ou não rejeitar a hipótese nula (H_0), de que as amostras são diferentes. Se $p \geq \alpha$, rejeita-se H_0 , e não se pode afirmar que há diferença significativa entre as médias das amostras. Se $p \leq \alpha$, aceita-se a hipótese H_0 , isto é, há uma diferença significativa entre as amostras.

4.7 Módulos de oscilação do arame: MAD e MOC

Conforme mencionado na seção 4.1, ao longo do trabalho foram utilizados dois módulos de oscilação do arame. Inicialmente os ensaios foram realizados com o Módulo de Alimentação Dinâmica – MAD (Figura 55). O equipamento fora projetado dentro do escopo de um projeto para soldagem de tubo cladeados e já havia sido utilizado também em outras pesquisas desenvolvidas pela equipe do laboratório, por exemplo, no trabalho de mestrado de Julia Dornelles [78].

O dispositivo consiste em um cabeçote de alimentação de arame integrado à fonte de soldagem, onde o bloco de roletes tracionadores oscila por meio de um mecanismo biela-manivela do tipo *scotch yoke*. Neste de mecanismo a biela tem comprimento infinito, transformando-se em uma corrediça. A grande vantagem em relação ao mecanismo biela-manivela convencional, é a capacidade de manter o movimento linear com uma trajetória de movimento harmônico simples, onde a velocidade instantânea é simétrica no meio do curso, correspondendo a uma curva sinusoidal [79]. Da mesma maneira, a aceleração e deslocamento também apresentam comportamento sinusoidal. Maiores detalhes sobre a velocidade do arame serão apresentados ao longo do trabalho.

Figura 55 – MAD – Módulo de Alimentação Dinâmica

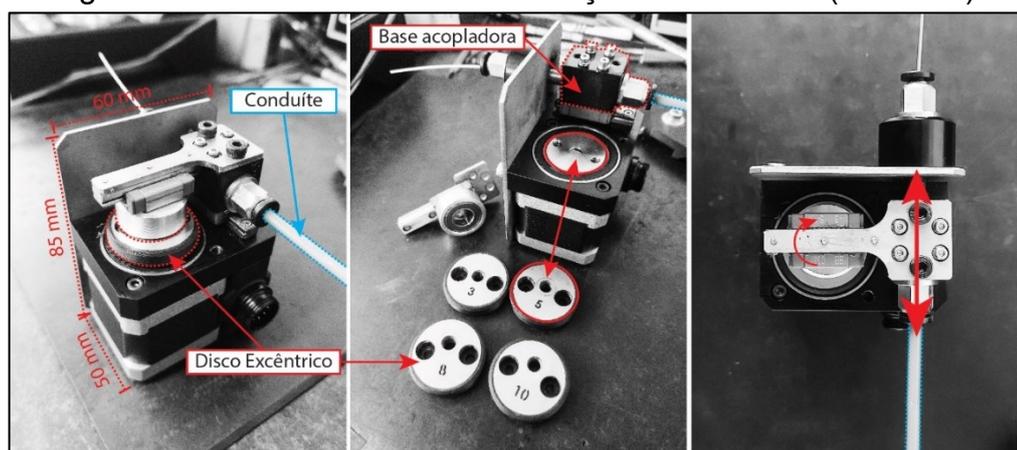


Fonte: elaborado pelo autor.

O equipamento permite regulagens da amplitude de oscilação entre 1,0 e 20,0 mm, e frequência de oscilação entre 0,5 e 20,0 Hz. Entretanto, frequências acima de 15,0 Hz foram evitadas pois a vibração do equipamento era bastante acentuada. Neste dispositivo, o motor de tração responsável pela alimentação do arame é comandado pela fonte de soldagem, enquanto o motor que promove a oscilação do bloco é comandado por um controlador externo.

Uma alternativa à oscilação do bloco de roletes é a oscilação do conduíte, o qual, por atrito, promove a oscilação do arame. Neste contexto, durante o desenvolvimento do trabalho, um segundo módulo de oscilação do arame foi desenvolvido pela equipe de projetos do LABSOLDA. O dispositivo foi denominado de Módulo de Oscilação de Conduíte – MOC.

Figura 56 – MOC – Módulo de Oscilação do Conduíte (Detalhes).

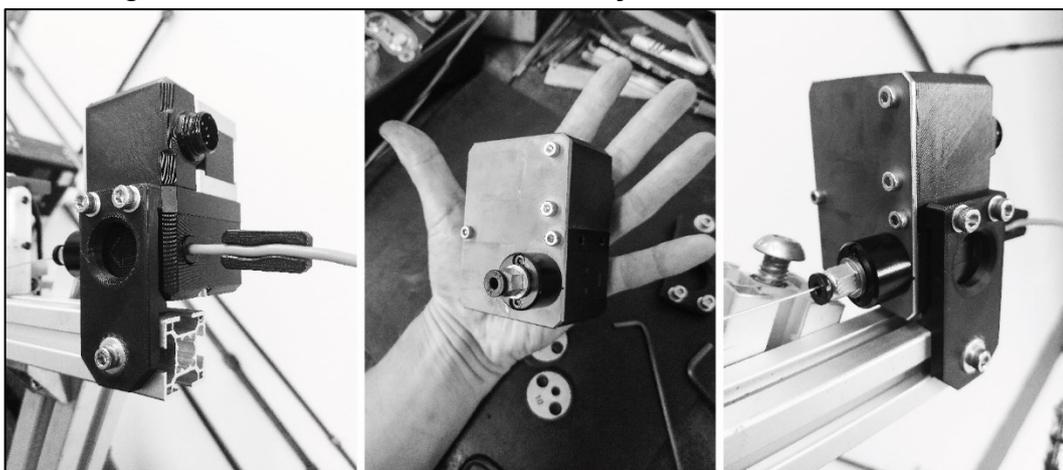


Fonte: elaborado pelo autor.

Assim como o MAD, este dispositivo apresenta um mecanismo do tipo *Scotch Yoke*, entretanto, para oscilar a base de acoplamento do condúite e não o bloco de roletes (Figura 56). A ausência do bloco permitiu o projeto de um equipamento com *design* bastante compacto e adaptável a diferentes configurações de tochas e bancadas de ensaios (Figura 57).

A amplitude de oscilação é regulada por meio do disco excêntrico, conforme mostrado na Figura 56. No presente trabalho foram utilizados discos com amplitudes de 5,0, 8,0 e 10,0 mm. Já a frequência de oscilação pode ser regulada numa faixa de 0,1 a 30,0 Hz.

Figura 57 - MOC – Modulo de oscilação de condúite montado.



Fonte: elaborado pelo autor.

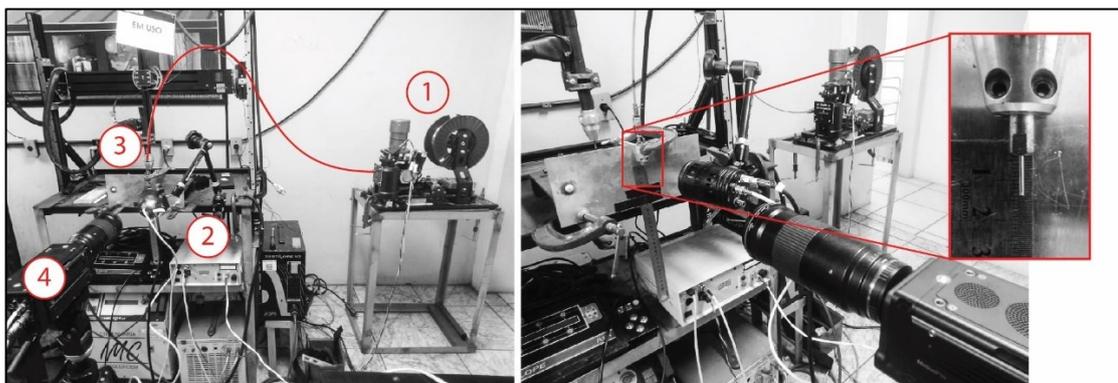
Vale ressaltar que o MOC é responsável apenas pela oscilação do arame, sendo necessário um cabeçote alimentador de arame para fornecer material de adição ao processo. Neste caso, utilizou-se um cabeçote convencional integrado a fonte de soldagem, o qual promove a alimentação de arame em velocidade constante conforme regulada na fonte.

4.7.1 Avaliação dos sistemas de alimentação dinâmica

Antes de iniciar os procedimentos de soldagem utilizando MAD, foi notado que a amplitude de oscilação o arame na ponta da tocha variava para diferentes frequências reguladas. Assim sendo, uma breve avaliação do equipamento foi realizada.

Visto que a disposição do conduíte influencia no movimento do arame, buscou-se aproximar a configuração da bancada à situação de uso real do MAD, principalmente em relação à disposição do conduíte e posicionamento da tocha. A Figura 58 mostra a bancada de ensaios utilizada.

Figura 58 – Bancada de ensaios para avaliação do MAD. 1 – MAD. 2 – Controlador do MAD. 3 – Saída do arame na tocha. 4 – Câmera de alta velocidade.



Fonte: elaborado pelo autor.

Os ensaios foram realizados sem abertura de arco, e variou-se a frequência de oscilação para três amplitudes (Tabela 4). Para a amplitude de 10mm, de modo a evitar acentuada vibração do dispositivo, a frequência mais alta foi de 13 Hz. Por meio de filmagem em alta velocidade, avaliou-se o comportamento oscilatório do arame na saída da tocha.

Tabela 4 – Matriz de ensaios para avaliação do MAD.

Amplitude (mm)	Frequências (Hz)
5,0	0,5 – 2,0 – 5,0 – 9,0 – 15,0
7,5	0,5 – 2,0 – 5,0 – 9,0 – 15,0
10,0	0,5 – 2,0 – 5,0 – 9,0 – 13,0

Após a mudança do MAD para o MOC nos ensaios de soldagem, também foi observado que a amplitude de oscilação do arame era influenciada por fatores externos. Assim sendo, uma breve série de ensaios foi realizada para avaliar, principalmente, a amplitude de oscilação do arame promovida pelo Módulo Oscilador de Conduíte.

Assim como para o MAD, a disposição do condutite tem forte influência no movimento oscilatório do arame. Dessa forma, foi avaliada a amplitude de oscilação para diferentes frequências de oscilação e configurações de condutite. Para tanto, a amplitude de oscilação foi mantida pelo disco excêntrico de 5,0 mm, e a frequência variada em 5,0, 10,0, 15,0 e 20,0 Hz.

Uma vez que o sistema de aquisição de dados, sobretudo a aquisição da velocidade de alimentação do arame, já estava validado, o comportamento do MOC foi feito via pós-processamento dos dados no software MATLAB.

4.8 Caracterização da alimentação dinâmica de arame no processo TIG

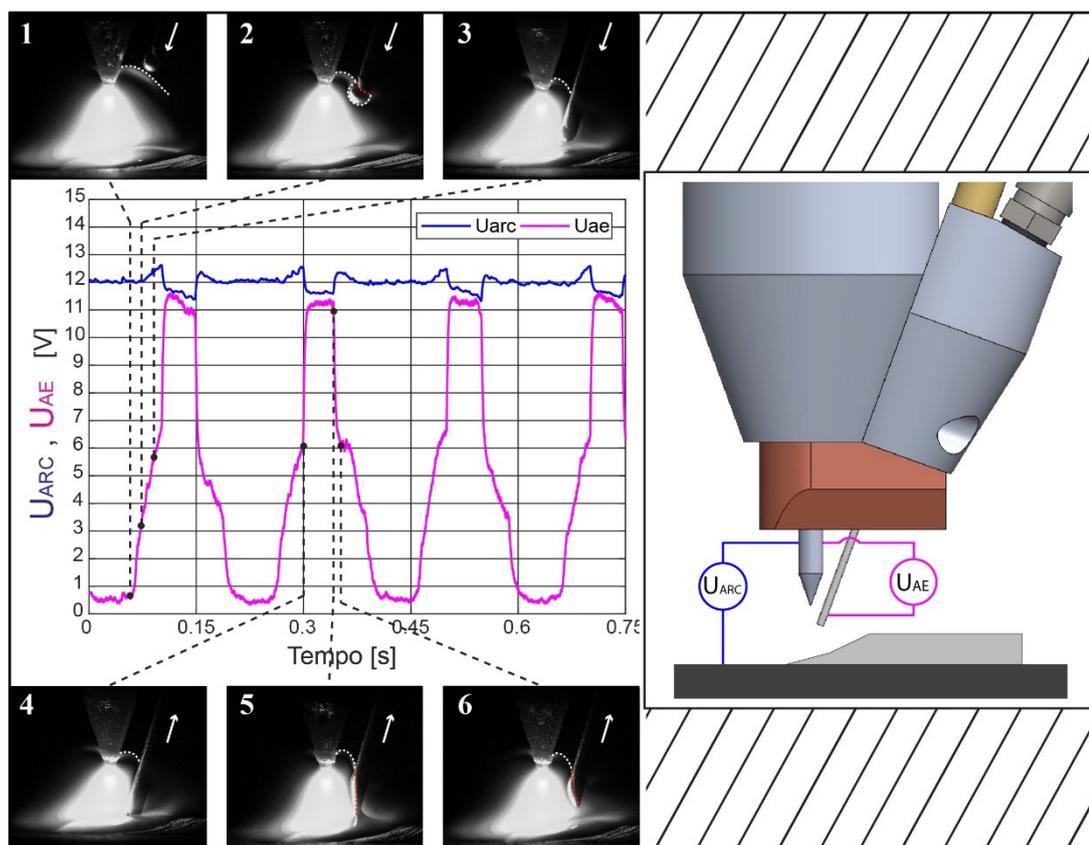
Nesta seção será descrito sobre a caracterização a alimentação dinâmica de arame por meio dos sinais elétricos adquiridos, concatenados com filmagens em alta velocidade e pós-processamento de dados. Para tanto, foram definidos e mensurados os eventos físicos inerentes à técnica de alimentação de arame no processo de soldagem TIG que tangem à transferência metálica e as etapas que compõe cada ciclo de destacamento de gota.

Usualmente, os parâmetros de soldagem monitorados por sistemas de aquisição de dados são corrente de soldagem (I_{ARC}), tensão do arco (U_{ARC}) e velocidade de alimentação de arame (VA). Entretanto, além dos sinais citados, a aquisição do sinal de tensão entre o eletrodo e o metal de adição, denominada aqui de tensão arame-eletrodo, (U_{AE}) é fundamental para a definição dos eventos que caracterizam a transferência metálica no processo TIG.

A Figura 59 mostra o comportamento da tensão arame-eletrodo durante o ciclo de oscilação do arame. No primeiro quadro, o arame encontra-se em seu recuo máximo, região mais afastada do arco. Entretanto, mesmo estando não energizado, isto é, em configuração de arame-frio onde não há passagem de corrente pelo arame, nota-se no sinal de tensão um valor na ordem de 0,5 V. À medida que o metal de adição avança em direção à poça e entra no arco elétrico, o sinal de tensão começa a aumentar. Considerando o arame como uma Sonda de Langmuir em condições flutuantes, isto é, não energizada, o sinal de tensão adquirido refere-se às regiões extremas do arco elétrico como definem Fanara e Vilarinho [80]. À medida que o arame entra e aproxima-se da região mais ao centro do arco elétrico, zona de maior densidade iônica, logo com maior densidade de corrente, o sinal de tensão passa a

aumentar. Segundo Vilarinho [48], além da região visível do arco elétrico, onde ocorre a saturação iônica, existem outras duas regiões mais afastadas não visíveis a olho nu, a região de saturação eletrônica e a região de condição flutuante. A região de saturação eletrônica demonstra a posição mais afastada do centro do arco onde existem elétrons disponíveis, mas não suficientes para proporcionar emissão de radiação luminosa significativa. Nesta região de saturação eletrônica ainda há corrente sendo carregada, visto que os elétrons são responsáveis por cerca de 97% do total de corrente. A zona flutuante é caracterizada pela região onde há influência do campo eletromagnético gerada pelo arco, e corresponde à região mais externa do arco elétrico. Pelos resultados encontrados, a hipótese é que o arame, quando afastado da poça, encontra-se na região de saturação eletrônica, visto que a tensão é diferente de zero.

Figura 59 - Variação do sinal de tensão arame-eletrodo de acordo com a posição do metal de adição no arco elétrico. Imagens realizadas com filtro óptico passa-banda de 470nm.

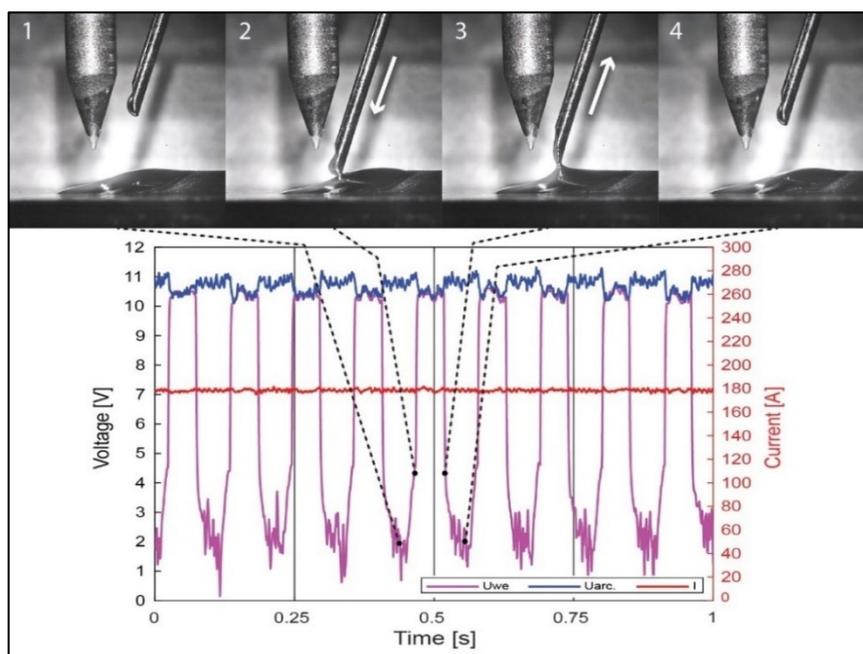


Fonte: elaborado pelo autor.

Ainda na Figura 59, os quadros 2 e 3 representam o aumento do sinal de tensão ainda em condição flutuante. No quadro 4, a variação repentina do sinal de tensão arame-eletrodo representa o estabelecimento da ponte metálica entre o arame e a poça de fusão. Nesta condição, o metal de adição encontra-se no mesmo potencial que a peça, logo o sinal de tensão atinge valores próximos ao da tensão do arco. A tensão arame-eletrodo permanece em patamares mais elevados durante todo o período em que a ponte metálica é estabelecida. Devido ao movimento de recuo do arame, no rompimento da ponte metálica, o sinal de tensão sofre uma queda abrupta (Quadro 6) e retorna a valores referentes à condição flutuante. Para este ensaio, foram utilizadas uma frequência de oscilação de 5 Hz, amplitude de 5mm para um VA de 1,5 m/min e corrente de arco de 180 A.

A Figura 60 mostra o oscilogramas de sinais de tensão e corrente característicos do processo de soldagem TIG com alimentação dinâmica de arame. Nas imagens, devido ao sistema de iluminação LASER, houve a supressão do arco elétrico, possibilitando a visualização nítida da transferência metálica. Embora as condições de testes tenham sido diferentes, os eventos que caracterizam o estabelecimento e ruptura da ponte metálica são facilmente detectados por meio do sinal de tensão arame-eletrodo. É possível notar também que, quando a ponte metálica é estabelecida, além da tensão arame-eletrodo aumentar, a tensão do arco sofre uma pequena queda, caracterizada pelo encurtamento do arco. Este fenômeno já fora reportado por Pigozzo e Silva [72] e Silva et al. [36] o qual observaram que quando o arame está em ponte (em contato com a poça de fusão), o arco tende a ancorar-se no metal de adição, ocorrendo um leve encurtamento em seu comprimento. Quando a ponte metálica se rompe, a tensão do arco volta ao patamar mais elevado.

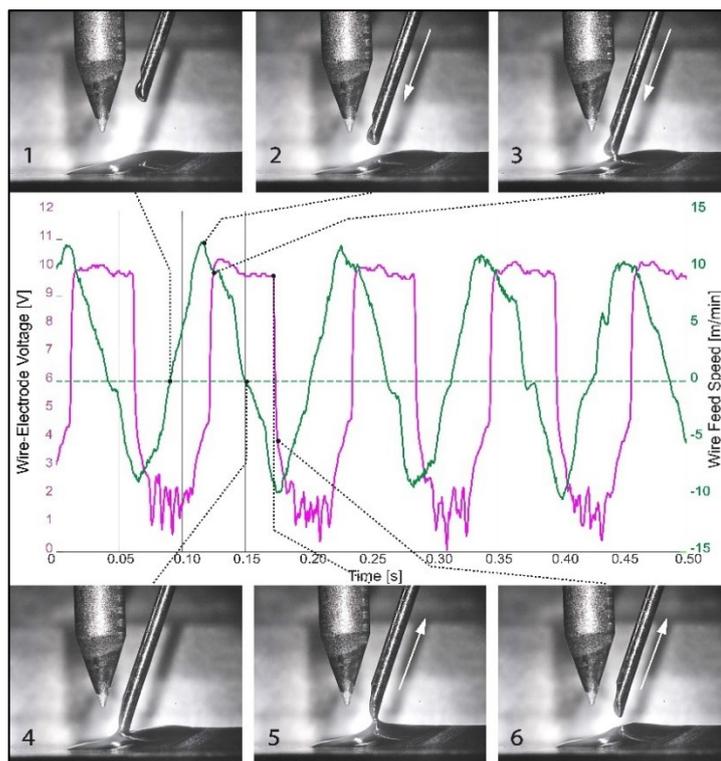
Figura 60 - Oscilograma dos sinais de tensão e corrente característicos do processo TIG com alimentação dinâmica de arame.



Fonte: elaborado pelo autor.

A Figura 61 mostra o sinal de tensão arame-eletrodo sobreposto à velocidade de arame (verde). Por convenção, sinais positivos de VA correspondem ao avanço do arame em direção à poça de fusão. No Quadro 1, o arame encontra-se na posição de afastamento máximo e sua velocidade é zero. À medida que o arame avança em direção a poça, a máxima velocidade de avanço é atingida antes de tocar a poça de fusão (Quadro 2). Em seguida, a ponte metálica é estabelecida (caracterizada pelo salto do sinal de U_{AE} - Quadro 3) já no período de desaceleração do arame. Entre os quadros 3 e 4, o arame segue avançando, “mergulhando” na poça de fusão. Embora o material seja fundido à poça metálica, o comprimento de arame alimentado durante a ponte metálica, foi denominado de “mergulho”. Já entre os Quadros 4 e 5, note que o arame inicia o movimento de recuo (velocidades negativas), entretanto, a ponte metálica permanece até sua ruptura (Quadro 5-6). O recuo de arame ainda em ponte metálica foi denominado de “recuo em ponte”. Com a parametrização deste ensaio, a ruptura da ponte ocorreu no instante em que a pico de velocidade de recuo foi atingido. Quando o arame retorna ao recuo máximo, inicia-se um novo ciclo de transferência metálica.

Figura 61 – Oscilograma dos tensão arame-eletrodo (U_{AE}) e velocidade de arame para processo TIG com alimentação dinâmica de arame.



Fonte: elaborado pelo autor.

A variação repentina do sinal de tensão arame-eletrodo permite a identificação acurada do instante em que a ponte metálica é estabelecida, seu período de duração e o momento da ruptura. Correlacionando os sinais de corrente (I_{ARC}) e tensão do arco (U_{ARC}) com V_A e U_{AE} , foram definidos parâmetros indiretos do processo TIG AD os quais caracterizam a transferência metálica, bem como o processo em si. Entende-se aqui como parâmetros indiretos, as variáveis intrínsecas ao processo as quais não são passíveis de regulação. A lista de parâmetro avaliadas no presente trabalho é relacionada na Tabela 5 e serão descritos em sequência.

Tabela 5 – Parâmetros utilizados para a caracterização do processo TIG AD.

Parâmetro	Símbolo	Definição
Corrente de arco	I_{ARC} [A]	Média das correntes instantâneas (I_{INST}) do arco
Tensão de arco	U_{ARC} [V]	Média das tensões instantâneas (U_{INST}) do arco
Potência de arco	P [W]	Média das potências instantâneas (P_{INST}) do arco
Tensão em ponte	U_{PT} [V]	Média de U_{INST} durante período de arame em ponte metálica
Tensão destacado	U_D [V]	Média de U_{INST} durante período de arame destacado
Tensão arame-eletrodo	U_{AE} [V]	Média das tensões instantâneas (U_{AE_INST}) entre arame e eletrodo
Tensão arame em ponte	U_{AE_P} [V]	Média de U_{AE_INST} durante o período de arame em ponte metálica
Tensão arame destacado	U_{AE_D} [V]	Média de U_{AE_INST} durante o período de arame destacado
Potência em ponte	P_{PT} [W]	Média de P_{INST} durante o período de arame em ponte metálica
Potência destacado	P_D [W]	Média de P_{INST} durante o período de arame destacado
Velocidade de alimentação de arame	VA_{MED}	Média das velocidades instantâneas (V_{INST}) de arame
Velocidade média de avanço	VA_A [m/min]	Média das velocidades de avanço de arame
Velocidade de pico de avanço	VA_{MAX_A} [m/min]	Média das velocidades de pico de avanço de arame
Velocidade média de recuo	VA_R [m/min]	Média das velocidades de recuo de arame
Velocidade de pico de recuo	VA_{MAX_R} [m/min]	Média das velocidades de pico de recuo de arame
Amplitude de avanço	A_A [mm]	Média das amplitudes de avanço do arame
Amplitude de recuo	A_R [mm]	Média das amplitudes de recuo de arame
Mergulho	M [mm]	Média dos comprimentos de arame avançados durante período em ponte metálica.
Recuo em ponte	R_P [mm]	Média dos comprimentos de arame recuados durante o período em ponte metálica
Afastamento máximo	AF	Média da máxima distância entre a ponta do arame e a poça metálica
Volume transferido	VT [mm]	Média dos volumes de arame transferido por ciclo
Tempo em ponte	T_{PT} [ms]	Média dos períodos de arame em ponte metálica
Tempo destacado	T_D [ms]	Média dos períodos de arame destacado

Os valores médios de tensão, corrente e potência foram calculados pela média dos valores instantâneos de cada grandeza (Equações (2), (3) e (4) respectivamente).

$$U_{ARC} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_{inst}(i) \quad (2)$$

$$I_{ARC} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_{inst}(i) \quad (3)$$

$$P_{ARC} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_{inst}(i) \cdot I_{inst}(i) \quad (4)$$

onde n é o número de aquisições da amostra.

A partir do sinal de tensão arame-eletrodo, definiu-se um valor de referência para definir a tensão que caracteriza o momento contato do arame com a poça metálica. O valor de referência pode ser diferente de acordo com parametrizações do processo. Logo, para cada análise foi determinado um valor de referência específico. Na Figura 60, por exemplo, a tensão de referência (U_{REF}) foi de 6 V, isto é, acima deste valor, considera-se que há ponte metálica, abaixo, o arame está destacado e não há ponte metálica. A partir de U_{REF} definem-se os parâmetros U_{PT} , U_D , U_{AE_PT} , U_{AE_D} , P_{PT} e P_D pelas seguintes equações.

$$U_{PT} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_{inst}(i) \quad se \{U_{AE_inst}(i) \geq U_{REF}\} \quad (5)$$

$$U_D = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_{inst}(i) \quad se \{U_{AE_INST}(i) < U_{REF}\} \quad (6)$$

$$U_{AE_PT} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_{AE_INST}(i) \quad se \{U_{AE_INST}(i) \geq U_{REF}\} \quad (7)$$

A

$$U_{AE_D} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_{AE_INST}(i) \quad se \{U_{AE_INST}(i) < U_{REF}\} \quad (8)$$

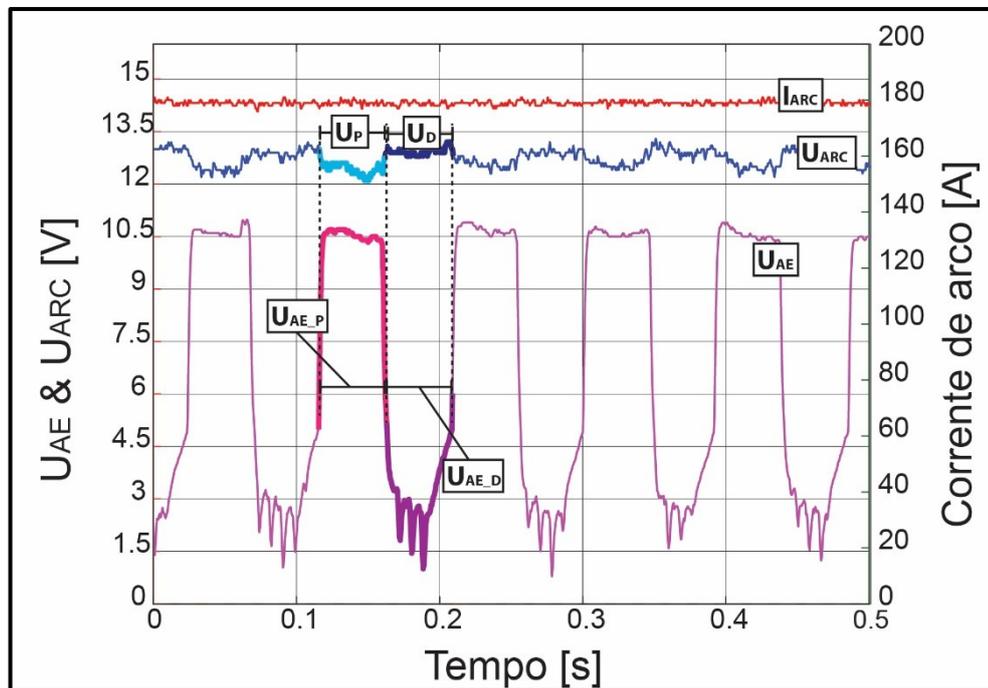
$$P_{PT} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_{inst}(i) \cdot I_{inst}(i) \quad se \{U_{AE_INST}(i) \geq U_{REF}\} \quad (9)$$

$$P_D = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_{inst}(i) \cdot I_{inst}(i) \quad se \{U_{AE_INST}(i) < U_{REF}\} \quad (10)$$

onde n é o número de aquisições da amostra e U_{AE_INST} a tensão eletrodo-arame instantânea.

Para melhor representar estas variáveis, a Figura 62 destaca os períodos em ponte e ponte destacada para os oscilogramas de U_{INST} , I_{INST} e U_{AE_INST} .

Figura 62 – Representação das variáveis calculadas nos oscilogramas de I_{ARC} , U_{ARC} e U_{AE} .



Fonte: elaborado pelo autor.

Uma vez que o MVS faz a leitura dos pulsos do *encoder*, é necessário o processamento de dados interno para o cálculo da velocidade de arame. Entretanto, como foram adquiridas cinco variáveis, para melhorar a eficiência e velocidade de aquisição e salvamento dos dados, optou-se por calcular a VA no pós-processamento de dados. A partir da leitura dos pulsos, encontra-se a variação de pulsos (Δ_{PUL}) ponto a ponto pela seguinte equação:

$$\Delta_{PUL}(i) = \sum_{i=1}^{n-1} PUL(i+1) - PUL(i) \quad (11)$$

onde PUL é a contagem de pulsos e n é o número de aquisições.

Com o Δ_{PUL} , a velocidade instantânea de arame pode ser calculada pela Equação (12).

$$VA_{INST}(i) = \frac{\Delta_{PUL}(i) \cdot C_{ENC}}{t_{aqi}} \cdot 0,06 \quad (12)$$

onde t_{AQI} é o intervalo de aquisição, C_{ENC} a constante do *encoder* e 0,06 o fator de correção de unidade (mm/s para m/min)

Com a velocidade instantâneas definida, foram calculadas VA_{MED} , VA_A , VA_R a partir das equações (13), (14) e (15) respectivamente.

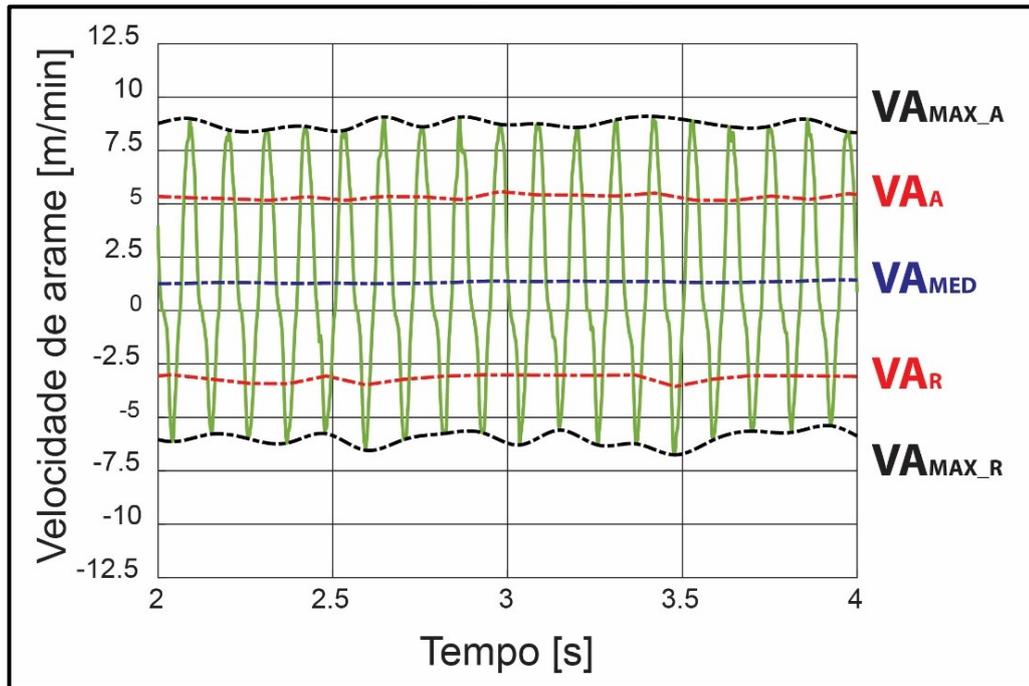
$$VA_{MED} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n VA_{inst}(i) \quad (13)$$

$$VA_A = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n VA_{inst}(i) \quad se \{VA_{inst}(i) > 0\} \quad (14)$$

$$VA_R = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n VA_{inst}(i) \quad se \{VA_{inst}(i) < 0\} \quad (15)$$

Para encontrar os valores de velocidades de pico de avanço e recuo, foi utilizado o método de envelopamento para os pontos de VA aquisitados. O método de envelope é utilizado para calcular amplitudes de um sinal, resultando em uma curva que descreve os picos ao longo do tempo. No presente trabalho, realizou-se o envelopamento dos valores de VA positivos e negativos separadamente, de modo que as velocidades de pico de avanço e recuo fossem definidas independentes uma da outra. A Figura 63 mostra graficamente as velocidades de arame discriminadas.

Figura 63 – Representação gráfica das velocidades calculadas: VA_{MED} , VA_A , VA_R , VA_{MAX_A} e VA_{MAX_R} .



Fonte: elaborado pelo autor.

Com o sinal de pulsos do *encoder* também foram calculados os parâmetros de deslocamento do arame, sendo eles as amplitudes de avanço (A_{AV}) e recuo (A_{REC}), afastamento máximo (AF), mergulho do arame (M) e recuo em ponte (R_p).

As amplitudes de avanço e recuo foram calculadas pelas seguintes equações:

$$A_{AV} = \sum_{i=1}^n \Delta_{PUL}(i) \cdot C_{ENC} \quad se \{VA_{inst}(i) > 0\} \quad (16)$$

$$A_R = \sum_{i=1}^n \Delta_{PUL}(i) \cdot C_{ENC} \quad se \{VA_{inst}(i) < 0\} \quad (17)$$

Diferente da amplitude de recuo, calculada a partir do somatório do deslocamento do arame durante o movimento de recuo, o afastamento máximo foi calculado a partir do deslocamento do arame durante o avanço, a partir do ponto de inversão de movimento (máximo recuo) até o encontro do arame com a poça (equação (18))

$$AF = \sum_{i=1}^n \Delta_{PUL}(i) \cdot C_{ENC} \quad se \left\{ \begin{array}{l} VA_{inst}(i) > 0 \\ U_{AE_{INST}}(i) < U_{REF} \end{array} \right\} \quad (18)$$

A pequena diferença entre a amplitude de recuo e afastamento máximo será esclarecida na seção de resultados.

Já o mergulho e alongamento da poça foram encontrados levando em consideração o sentido de deslocamento, dado pelo sinal de VA, e pela condição de ponte metálica. Os valores foram calculados pelas equações (19) e (20)

$$M = \sum_{i=1}^n \Delta_{PUL}(i) \cdot C_{ENC} \quad se \left\{ \begin{array}{l} VA_{inst}(i) > 0 \\ U_{AE_{INST}}(i) \geq U_{REF} \end{array} \right\} \quad (19)$$

$$Rp = \sum_{i=1}^n \Delta_{PUL}(i) \cdot C_{ENC} \quad se \left\{ \begin{array}{l} VA_{inst}(i) < 0 \\ U_{AE_{INST}}(i) \geq U_{REF} \end{array} \right\} \quad (20)$$

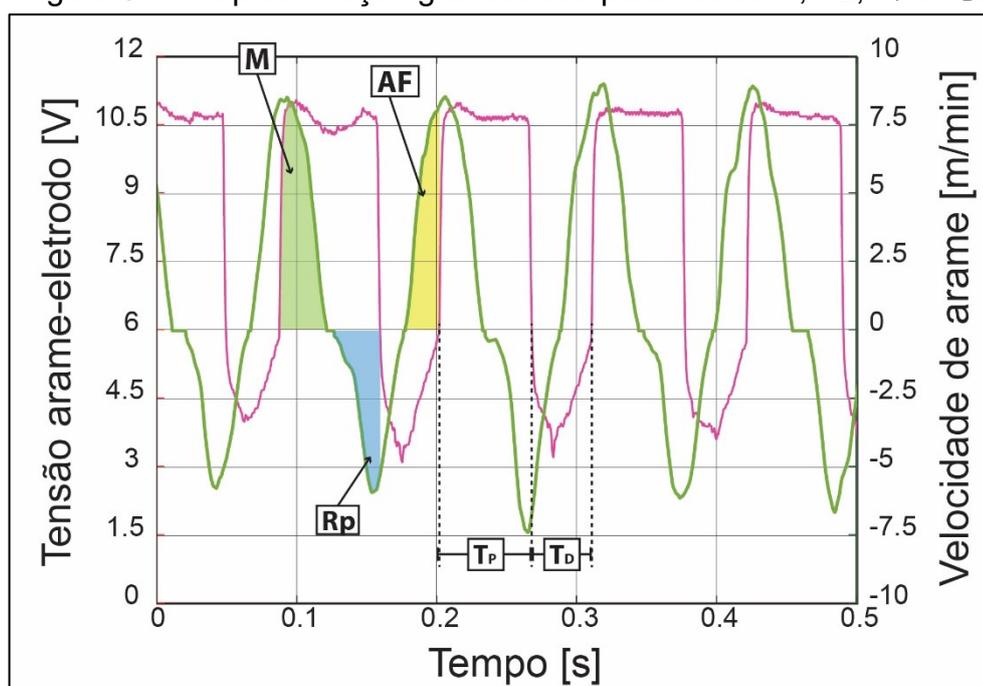
Por fim, foram medidos os períodos do arame em ponte metálica e do arame destacado (equações (21) e (22) respectivamente).

$$T_{PT} = \sum_{i=1}^n T(i) \quad se \{U_{AE_{INST}}(i) \geq U_{REF}\} \quad (21)$$

$$T_D = \sum_{i=1}^n T(i) \quad se \{U_{AE_{INST}}(i) < U_{REF}\} \quad (22)$$

onde T é sinal (contador) de tempo adquirido.

Figura 64 – Representação gráfica dos parâmetros M, AL, T_P e T_D.



Fonte: elaborado pelo autor.

É importante ressaltar que o cálculo das variáveis foi feito ciclo a ciclo. Para tanto, o algoritmo desenvolvido armazena os valores médios de cada variável para então calcular a média geral da amostra selecionada. Ademais, para todas as variáveis calculadas, foram considerados os respectivos desvios padrões e as incertezas padrões aferidas pela seguinte equação:

$$\text{Incerteza} = \sigma \cdot t(\alpha, \nu) \quad (23)$$

onde σ é o desvio padrão da amostra; t é o coeficiente t-student para o nível de significância α e graus de liberdade ν , dado por ($\nu = n-1$). No presente trabalho, foi considerado o nível de significância $\alpha = 0,05$.

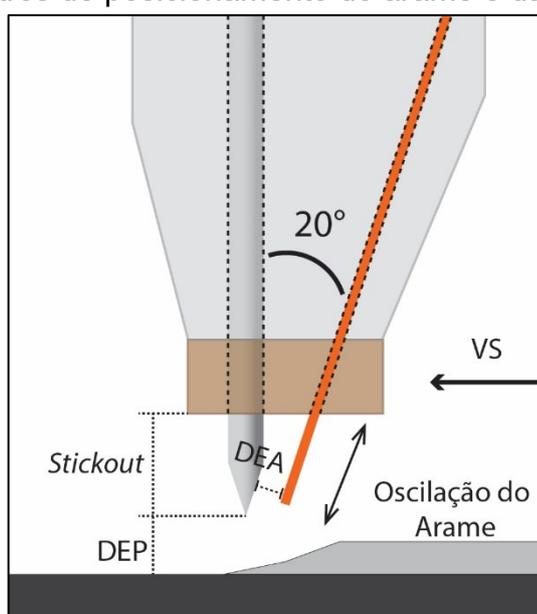
4.9 Ensaios de soldagem

4.9.1 Variação da frequência de oscilação de arame - MAD

A primeira série de ensaios de soldagem foi realizada com o Módulo de Alimentação Dinâmica - MAD – variando a frequência de oscilação de arame. Cordões

de solda tipo *bead on plate* (cordão único) com arame de aço inoxidável 316LSi foram depositados sobre chapas de aço carbono ASTM A36 com 9,53 mm (3/8") de espessura, 76,2 mm (3") de largura e 200 mm de comprimento. A corrente de soldagem foi estabelecida em 180 A, valor comum para processo TIG automatizado. A distância eletrodo-peça foi definida em 3,2 mm e a distância eletrodo-arama foi de 1,0 mm. A velocidade de soldagem (VS) foi 16 cm/min e o deslocamento da tocha configurou a alimentação de arame por trás do arco em condição de arame frio (Figura 65).

Figura 65 - Parâmetros de posicionamento do arame e da tocha de soldagem.



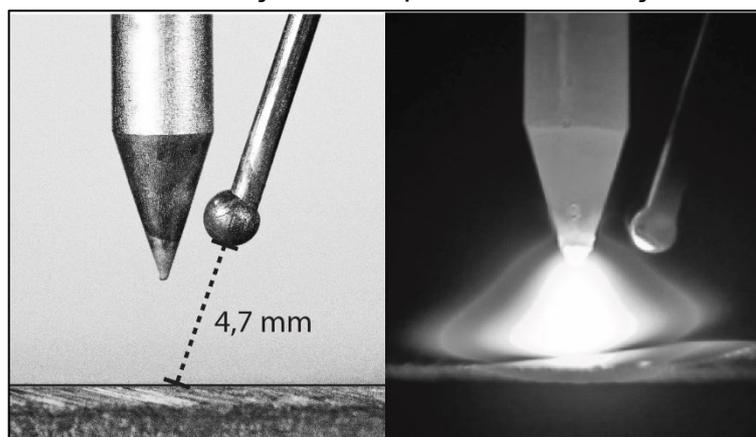
Fonte: elaborado pelo autor.

Com os parâmetros acima definidos, dois ensaios preliminares foram necessários para definir a velocidade de alimentação de arame e a amplitude de oscilação de arame.

A amplitude de oscilação foi definida em um ensaio com alimentação constante de arame onde, durante o procedimento, interrompeu-se a alimentação liberando os roletes de tração do cabeçote alimentador. Desse modo, o arame parou de avançar, porém continuou fundindo, formando uma gota na ponta. Uma vez que a gota formada “escala” o arame devido a tensão superficial (*melt back*), houve um momento em que a ponta do arame parou de fundir e a gota formada se estabilizou. A Figura 66 mostra que a gota parou de fundir a uma distância de aproximadamente

4,7 mm da peça. Dada esta condição, definiu-se em 5 mm a amplitude de oscilação do arame.

Figura 66 – Determinação da amplitude de oscilação do arame.



Fonte: elaborado pelo autor.

Para definir a velocidade de alimentação de arame, foram encontrados os limites operacionais para a condição de alimentação dinâmica e alimentação convencional. Para tanto, durante o procedimento de soldagem, a velocidade de alimentação foi variada e os limites superiores e inferiores de VA foram estabelecidos. São eles:

- **Limite superior de VA:** maior velocidade de arame sem que ocorra o choque de arame sólido com a peça, evento conhecido também como *sticking*.
- **Limite inferior Alimentação Convencional (AC):** menor velocidade de alimentação que mantivesse a ponte metálica contínua.
- **Limite inferior Alimentação Dinâmica (AD):** menor velocidade de arame que mantivesse o destacamento de gota na mesma frequência de oscilação, isto é, um destacamento de gota a cada ciclo.

As velocidades encontradas para cada condição são mostradas na Tabela 6

Tabela 6 – Limites de velocidade de arame para alimentação dinâmica (AD) e convencional (AC).

	AD	AC
Limite superior	1,7 m/min	2,2 m/min
Limite Inferior	0,7 m/min	1,3 m/min

Dado os limites, a velocidade de arame definida foi de 1,5 m/min. Esta VA se encontra dentro dos limites operacionais para ambas as condições de alimentação. Entretanto, mesmo com a VA acima do limite inferior para AC em ponte contínua, em alguns momentos a ponte era quebrada e a transferência passava ser intermitente. Para evitar que houvesse quebra da ponte metálica no ensaio com alimentação convencional em ponte contínua, a DEA foi aumentada para 1,5 mm. Maiores consideração sobre a velocidade de alimentação de arame e dos limites operacionais serão discutidas na seção de resultados 5.2. Os parâmetros de soldagem utilizados são mostrados na Tabela 7.

Tabela 7 – Parâmetros de soldagem da série variando a frequência de oscilação do arame.

Parâmetro	Valor
Corrente de soldagem	180 A
Velocidade de Arame	1,5 m/min
DEP	3,2 mm
DEA	1 mm – 1,5 mm*
Velocidade de Soldagem	16 cm/min
Amplitude de Oscilação	5 mm
Frequências de Oscilação	0,0 - 2,0 – 3,0 – 4,0 – 5,0 – 6,0 – 7,0 – 9,0 – 12,0 – 15,0 Hz
Vazão de gás de proteção	13 l/min

* Ensaio AC em Ponte contínua

4.9.2 Variação da amplitude de oscilação – MAD

Nesta sequência de ensaios foi variada a amplitude de oscilação para dois níveis de frequência, 6 e 9 Hz. Os parâmetros de soldagem foram mantidos conforme a serie anterior, e as amplitudes foram variadas em 3,0, 5,0 e 10 mm.

Assim como na série anterior, cordões de solda *bead on plate* com arame de aço inoxidável 316LSi foram depositados sobre chapas de aço carbono ASTM A36 com 9,53 mm (3/8”) de espessura. A Tabela 8 mostra os parâmetros de soldagem utilizados.

Tabela 8 - Parâmetros de soldagem da série variando a amplitude de oscilação do arame.

Parâmetro	Valor
Corrente de soldagem	180 A
Velocidade de Arame	1,5 m/min
DEP	3,2 mm
DEA	1 mm
Velocidade de Soldagem	16 cm/min
Amplitude de Oscilação	3,0 – 5,0 – 10,0 mm
Frequências de Oscilação	6,0 – 9,0 Hz
Vazão de gás de proteção	13 l/min

4.9.3 Variação da frequência de oscilação para diferentes níveis de corrente – MAD

Além da corrente de 180 A, foram realizados duas series de ensaios com níveis de corrente diferentes: 110 A e 250 A. A velocidade de alimentação de arame para os níveis de corrente utilizados foi definida pela seguinte relação:

$$C_{VA} = \frac{VA}{P_{ARC}} \quad (24)$$

onde C_{VA} é a constante de alimentação, VA é velocidade de arame e P_{ARC} a potência do arco.

Para a corrente de 180 A, a potência média do arco em procedimento autógeno foi de 1980 W. Pela equação (24), a constante de alimentação calculada foi 0,757 para a VA de 1,5 m/min. Esta mesma relação de VA e potência foi utilizada para encontrar os valores de VA para as correntes de 110 A e 250 A. A Tabela 9 mostra os valores de VA calculados.

Tabela 9 – VA calculada para correntes de 110 A e 250 A.

CORRENTE	P MÉD*	C_{VA}	VA calculada
180 A	1,980 kW		1,5 m/min
110 A	0,976 kW	0,757	0,7 m/min
250 A	3,091 kW		2,3 m/min

* Potência média para processo autógeno.

A frequência de oscilação foi variada de em 0, 3, 6 e 9 Hz. Os parâmetros utilizados são mostrados na Tabela 10.

Tabela 10 - Parâmetros de soldagem para serie com diferentes níveis de corrente de soldagem.

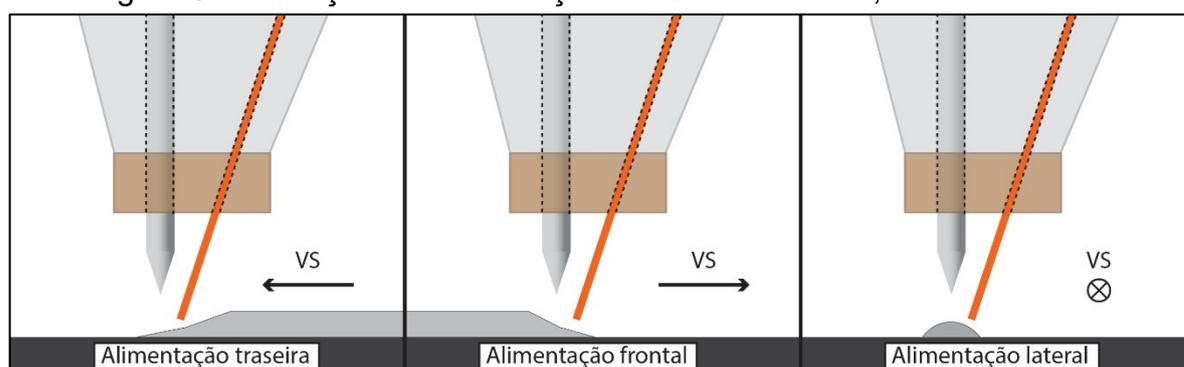
Parâmetro	110 A	180 A	250 A
Velocidade de Arame	0,7 m/min	1,5 m/min	2,3 m/min
DEP	2,5 mm	3,2 mm	3,2 mm
DEA	1,0 mm	1,0 mm	1,0 mm
Velocidade de Soldagem		16 cm/min	
Amplitude de Oscilação		5,0 mm	
Frequências de Oscilação		3,0, 6,0 e 9,0 Hz	
Vazão de gás de proteção		13 l/min	

4.9.4 Ensaios variando posição de inserção do arame - MOC

Conforme apresentado na seção 3.2.2, uma das vantagens defendidas por alguns autores [8, 48], é que devido à proximidade do arame com o eletrodo, configurando a inserção de topo, a variação da posição de inserção de arame (frontal, lateral ou traseira) tem pouca influência sobre as geometrias do cordão. Neste contexto, foi avaliado a influência da alimentação dinâmica sobre diferentes posições de inserção do arame.

Além da posição de inserção traseira, foram realizados ensaios com alimentação frontal e lateral. A Figura 67 mostra esquematicamente cada uma das configurações de posição de alimentação.

Figura 67 – Posição de alimentação de arame: traseira, frontal e lateral.



Fonte: elaborado pelo autor.

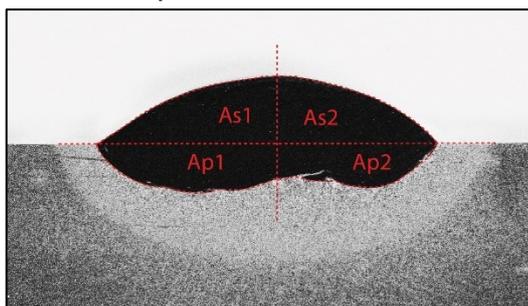
As três condições foram avaliadas nas frequências de 6,0, 9,0 e 12,0 Hz, além da condição de 0 Hz (alimentação convencional). As chapas de aço carbono ASTM A36 com 9,53 mm de espessura e arame de aço inoxidável 316LSi foram mantidos. A Tabela 11 lista os parâmetros utilizados.

Tabela 11 – Parâmetros de soldagem para a série variando a posição de alimentação do arame.

Parâmetro	Valor
Corrente de soldagem	180 A
Velocidade de Arame	1,5 m/min
DEP	3,2 mm
DEA	1,5 mm
Velocidade de Soldagem	16 cm/min
Amplitude de Oscilação	5,0 mm
Frequências de Oscilação	0,0 – 6,0 - 9,0 - 12 Hz
Vazão de gás de proteção	13 l/min

Para esta série de ensaios foi considerado também um índice de simetria, tanto para área fundida quanto para área penetrada. Para tanto, considerou-se as áreas fundidas e penetradas medidas no software Adobe Photoshop, de acordo com a Figura 68.

Figura 68 – Áreas para cálculo de índices de simetria



Fonte: elaborado pelo autor.

Os índices são calculados pelas seguintes equações:

$$IS_{AP} = \frac{Ap2}{Ap1} \quad (25)$$

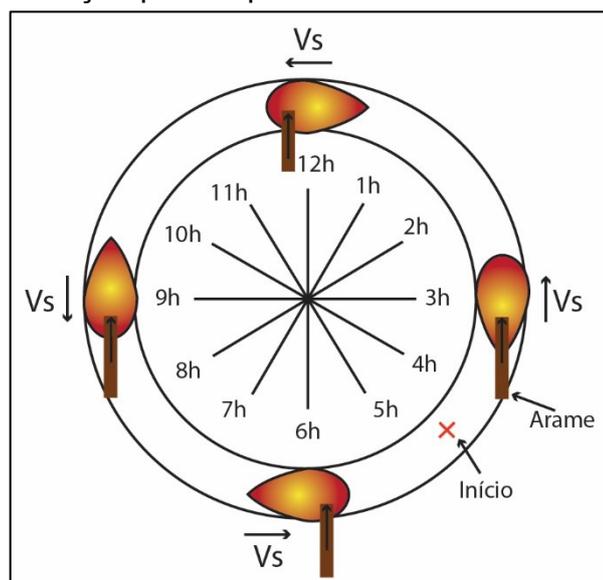
onde Ap1 e Ap2 correspondem às áreas penetradas direita e esquerda

$$IS_{AF} = \frac{As1 + Ap1}{As2 + Ap2} \quad (26)$$

Onde As1 e As2 correspondem às áreas do reforço do cordão direita e esquerda. Vale ressaltar que para que o índice apresente valor máximo igual a 1,0, a ordem entre numerado e denominador das equações acima deve ser alterada de acordo com as áreas medidas, sendo a maior área como denominador.

Além dos ensaios tipo *bead on plate* foram realizados experimentos com deslocamento circunferencial, de modo que a posição relativa alterasse à medida que a tocha se deslocava sobre a peça conforme mostra a Figura 69. Os cordões foram realizados utilizando a mesma parametrização mostrada na Tabela 11. Como referência, a circunferência foi dividida de acordo com as posições das horas de um relógio. O início de cordão se deu na posição referente à 4h30min.

Figura 69 – Esquemático de deslocamento de tocha e variação da posição de inserção para experimento circunferencial.



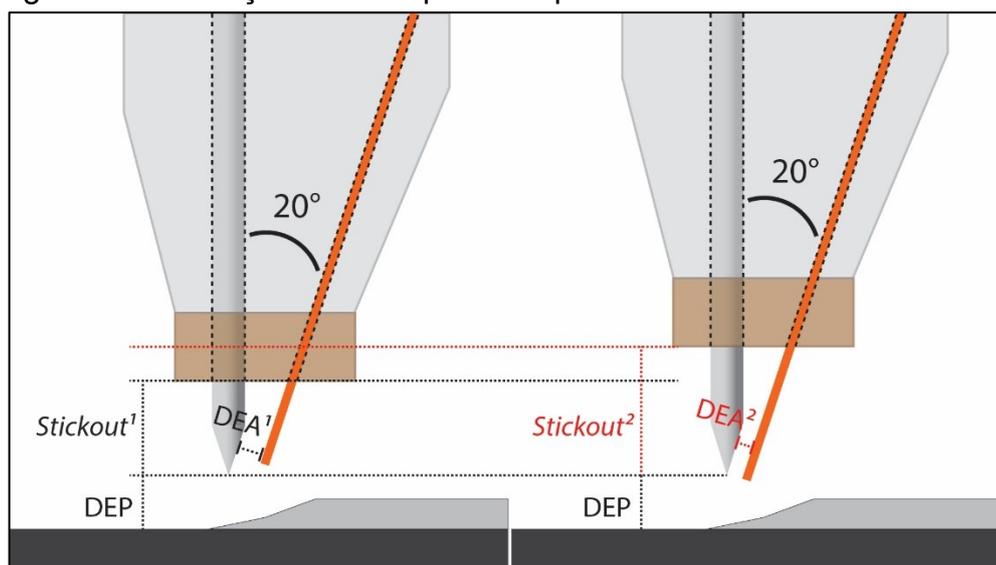
Fonte: elaborado pelo autor.

Para cada cordão circunferencial, três medições da altura e largura do cordão foram aferidas em cada posição utilizando um paquímetro com resolução de 0,02 mm.

4.9.5 Variação da distância eletrodo-aramé (DEA) – MOC

O terceiro parâmetro avaliado foi a distância eletrodo arame. Além de 1,0 mm, ensaios com a DEA de 1,5 e 2,0 mm também foram executados. A Figura 70 mostra como a DEA pode ser ajustada variando o comprimento livre do eletrodo (*electrode stickout*). Quanto maior o *stickout* menor é a DEA, pois o eletrodo se aproxima do arame.

Figura 70 – Variação da DEA pelo comprimento do *stickout* do eletrodo.



Fonte: elaborado pelo autor.

As chapas utilizadas como metal de base e o arame de metal de adição foram os mesmos das series anteriores. Os parâmetros utilizados são mostrados na Tabela 12.

Tabela 12 - Parâmetros de soldagem da série variando a distância eletrodo-arame

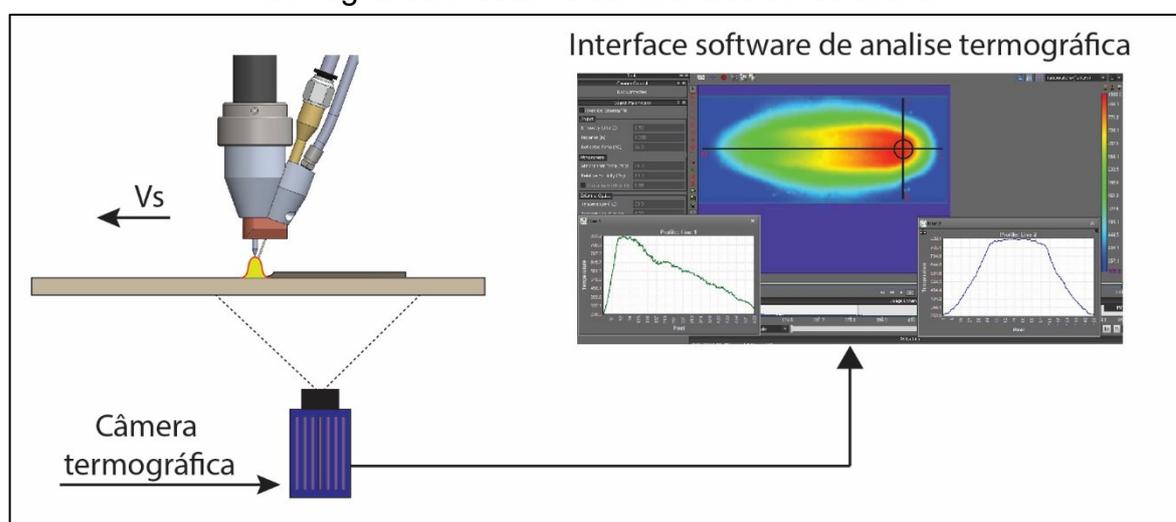
Parâmetro	Valor
Corrente de soldagem	180 A
Velocidade de Arame	1,5 m/min
DEP	3,2 mm
DEA	1,0 – 1,5 – 2,0 mm
Velocidade de Soldagem	16 cm/min
Amplitude de Oscilação	5,0 mm
Frequências de Oscilação	9,0 Hz
Vazão de gás de proteção	13 l/min

4.9.6 Ensaios para medições de temperatura por termografia infravermelho – MOC

Os resultados referentes à medição indireta de temperatura no processo TIG com alimentação dinâmica apresentados por Paes [7] e Riffel [9] mostram que houve uma redução na temperatura da poça quando comparada com alimentação

convencional. Entretanto, os autores utilizaram inserção radial pela frente do arco. A fim de avaliar o comportamento da temperatura da poça para a inserção de topo por trás do arco, fez-se o uso de filmagem termográfica com medição indireta da temperatura, isto é, não foi medida a temperatura da poça, mas sim na parte posterior da chapa, conforme mostra a Figura 71. A temperatura da poça foi analisada no sentido longitudinal e transversal, além da temperatura média e máxima da área circular destacada na figura. Vale ressaltar que os valores medidos podem não condizer com a temperatura real de peça, visto que a emissividade do material varia de acordo com a temperatura e condições da superfície. Assim sendo, o método utilizado será avaliado de maneira qualitativa, uma que vez as condições das superfícies dos cupons foram equivalentes.

Figura 71 – Esquemático de ensaio para medição de temperatura por câmera termográfica e detalhe da interface do software.



Fonte: elaborado pelo autor.

Os ensaios foram realizados em dois níveis de corrente, 115 A e 190 A, nas frequências de 0, 3, 6, 9, 12, 15 e 18 Hz. Além disso, também foram realizados ensaios variando a amplitude de oscilação do arame. Os parâmetros utilizados são mostrados na Tabela 13.

Tabela 13 – Parâmetros de soldagem para ensaios de medição da temperatura.

Parâmetro	Valor	
Corrente de soldagem	115 A	190 A
Velocidade de Arame	0,9 m/min	1,5 m/min
DEP	3,2 mm	
DEA	1,5 mm	
Velocidade de Soldagem	15 cm/min	
Amplitude de Oscilação	5,0 – 8,0 – 10,0 mm	
Frequências de Oscilação	0 – 3 – 6 – 9 – 12 – 15 - 18 Hz	
Vazão de gás de proteção	13 l/min	

Além da inserção de topo, quatro ensaios utilizando inserção radial em 70° foram realizados nas frequências de 0, 3 9 e 15 Hz com corrente de 190 A e VA de 1,5 m/min.

Com o intuito de medir maiores gradiente de temperatura, chapas de menor espessura foram utilizadas. Neste caso, a espessura das chapas utilizadas foi de 4,76 mm.

Para estes ensaios, a câmera termográfica utilizada foi a T1030SC da marca FLIR. O equipamento apresenta uma faixa de medição de -40 a 2000 °C com resolução de 1024x768 pixels. Para esta resolução, a taxa de aquisição é de 120 Hz. A análise das aquisições termográficas foi feita no *software* Altair da própria fabricante da câmera (FLIR).

Figura 72 – Câmera termográfica FLIR T1030SC



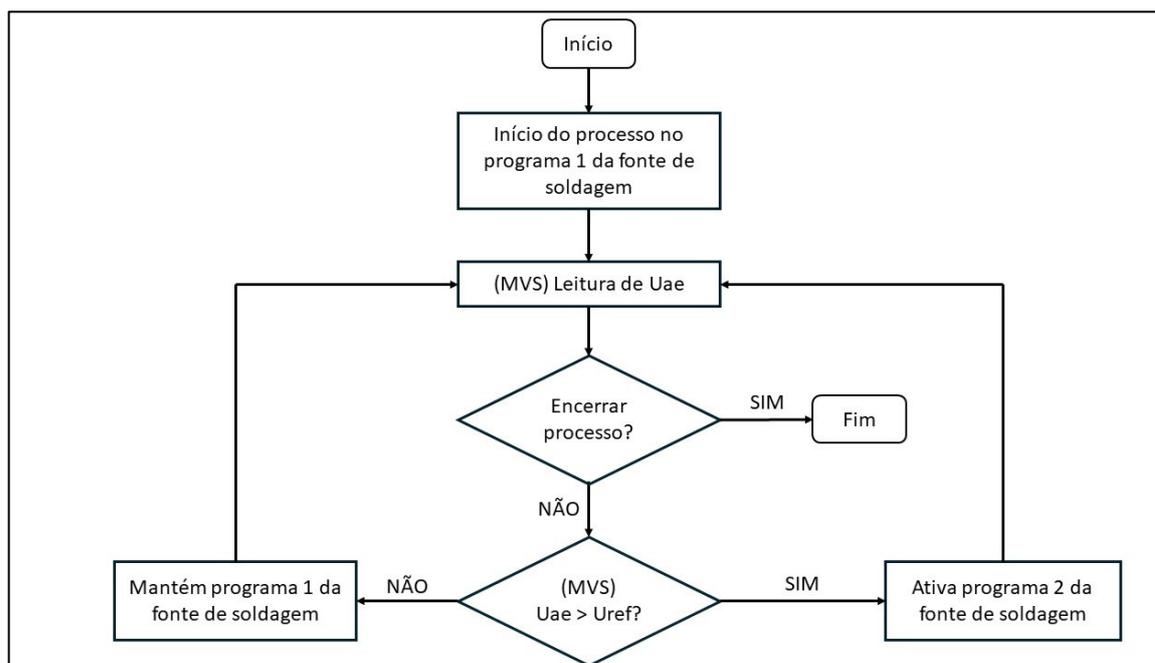
Fonte: website do fabricante Flir

4.9.7 Sincronismo da alimentação dinâmica com corrente pulsada

Durante alguns procedimentos de revestimento realizados em atividades paralelas a este trabalho, surgiu a ideia de sincronizar a alimentação dinâmica de arame com a pulsação da corrente de soldagem. Neste caso, o objetivo principal foi adotar uma estratégia que minimizasse a diluição. A hipótese levantada foi de que um pulso de corrente durante o período de ponte metálica favorecesse a taxa de deposição do material, enquanto o período de ponte destacada fosse mantido num baixo nível de corrente de base, reduzindo penetração, logo, diluição.

Nesse contexto, a lógica utilizada consistiu em variar os parâmetros de soldagem na fonte a partir do sinal da U_{ae} como referência. Desse modo, o sistema de aquisição de dados (MVS) monitora o sinal de tensão arame-eletrodo em uma frequência de 10 kHz, e a partir de um valor de referência regulável (U_{ref}), envia um sinal alto, quando $U_{ae} > U_{ref}$, ou baixo, quando $U_{ae} < U_{ref}$. A fonte de soldagem recebe este sinal através de um protocolo de comunicação serial, e a partir dele, carrega parâmetros previamente salvos. Vale ressaltar que a fonte utilizada permite o salvamento de até 10 programas. Para esta metodologia, foram utilizados os programas 1 para o sinal de nível baixo, e programa 2 para sinal de nível alto. Ademais, o sinal é enviado a fonte numa frequência de 5 kHz. O fluxograma apresentado na Figura 73 representa a lógica programada.

Figura 73 – Fluxograma da lógica de sincronia entre corrente pulsada e alimentação dinâmica



Fonte: elaborado pelo autor.

Uma vez que o sinal enviado para a fonte carrega quaisquer parâmetros regulados nos programas 1 e 2, a lógica de sincronismo poderia também ser invertida, isto é, os parâmetros de pulso de corrente permaneceriam durante o período em ponte destacada, enquanto a corrente de base é acionada durante o contato do arame com a poça. É importante ressaltar que nesta configuração o sinal que comanda a sincronia é a tensão entre arame e eletrodo, a qual varia com oscilação do arame. Assim sendo, quem “comanda” a frequência de pulsação da corrente é a própria frequência de oscilação do arame.

Após o êxito em ensaios preliminares para avaliar o sistema implementado, foram avaliadas três condições de corrente pulsada com alimentação dinâmica de arame:

- **Corrente pulsada sem sincronia:** Alimentação dinâmica de arame sem sincronia com a corrente pulsada;
- **Corrente pulsada e sincronia no pulso:** Comando para corrente de pulso durante o período de ponte metálica;
- **Corrente pulsada e sincronia na base:** Comando para corrente de base durante o período de ponte metálica;

Os parâmetros utilizados para os ensaios com sincronia na base e no pulso são mostrados na Tabela 14

Tabela 14 – Parâmetros utilizados para ensaios com sincronia no pulso e na base.

Parâmetro	Valor
Corrente de Base	100 A
Corrente de Pulso	180 A
Velocidade de Arame	0,9 m/min
DEP	3,2 mm
DEA	1,5 mm
Velocidade de Soldagem	12 cm/min
Amplitude de Oscilação	5,0 mm
Frequências de Oscilação	1 – 2 - 3 – 6 - 9 Hz
Vazão de gás de proteção	13 l/min

Nos ensaios sem sincronia, a frequência de pulsação foi de 1 e 2,5 Hz, e a frequência de oscilação do arame em 0, 5 e 10 Hz. Os demais parâmetros foram mantidos os mesmos da Tabela 14.

Por fim, para critério de comparação, foram realizados ensaios utilizando a corrente média medida nos ensaios com sincronia no pulso. Os valores de I_{med} para cada frequência utilizada são mostrados na Tabela 15, enquanto os demais parâmetros foram mantidos.

Tabela 15 – Valores de corrente média dos ensaios com sincronia no pulso para as frequências de 3, 6 e 9 Hz.

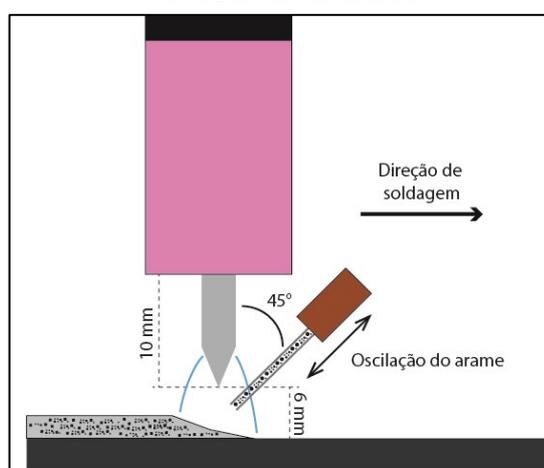
Frequência de oscilação	Corrente Média
3 Hz	132 A
6 Hz	135 A
9 Hz	138 A

4.10 Ensaios de soldagem Aplicados

4.10.1 Revestimento duro com carbeto de tungstênio

Durante o desenvolvimento do trabalho, foram realizados experimentos de revestimento duro utilizando arame tubulares com carbeto de tungstênio. A composição da liga utilizada (CORODUR AO-Br) é mostrada na Tabela 2 da seção 4.3. Nestes experimentos, o ângulo de inserção foi aumentado para 45° e o arame alimentado pela frente do arco (Figura 74). Esta configuração de inserção foi necessária com intuito de minimizar a contaminação do eletrodo, visto eu com o ângulo reduzido em 20° as partículas de carbonetos acabavam atingindo o eletrodo.

Figura 74 – Esquemático dos parâmetros de inserção do arame para ensaio de revestimento duro.



Fonte: elaborado pelo autor.

Para cordões do tipo *bead on plate* a frequência de oscilação foi variada em 0, 5, 10 e 15 Hz, enquanto as amostras de revestimento (cordões sobrepostos), comparou-se alimentação dinâmica em 10 Hz com alimentação convencional (0 Hz). Para estes ensaios, aplicou-se o deslocamento da tocha em tecimento. Os parâmetros utilizados são mostrados na Tabela 16.

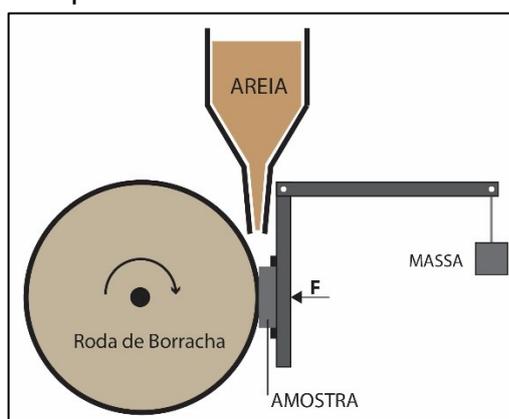
Tabela 16 – Parâmetros de soldagem para ensaios de revestimento duro.

Parâmetro	Bead on plate	revestimento
Corrente de Soldagem [A]	170	170
Tensão do arco ⁽¹⁾ [V]	12.0	11.4
Potência* [W]	2050	1976
Amplitude de tecimento [mm]	-	8.0
Frequência de tecimento [Hz]	-	1.0
Amplitude de oscilação do arame [mm]	8	8
Frequência de oscilação do arame [Hz]	0-5-10-15	0 - 10
Velocidade do arame [m/min]		1
Velocidade de soldagem [mm/s]		2
DEP [mm]		6
Ângulo de inserção		45°
Vazão de gás [l/min]		13

⁽¹⁾ Média dos sinais aquisitados (estatisticamente iguais)

Nas amostras de revestimento realizou-se também teste de abrasão segundo a norma ASTM G65 Figura 75. Os ensaios foram conduzidos utilizando areia com granulometria de 50 *mesh* e carga de 130N durante 30 min (6000 rotações em 200 rpm).

Figura 75 – Esquemático de teste de abrasão ASTM G65.



Fonte: elaborado pelo autor.

Além da microdureza (descrito na seção 4.5.10 e resistência a abrasão, avaliou-se também a dispersão dos carbonetos na matriz de solda. A aferição foi feita

nas seções transversais dos cordões utilizando os *softwares* de edição de imagem Adobe Photoshop e Illustrator.

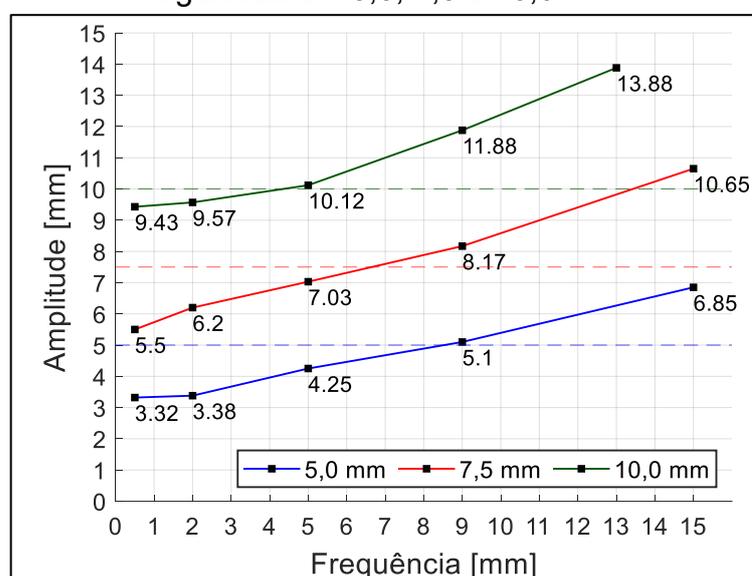
5 RESULTADOS

5.1 Ensaios preliminares

5.1.1 Avaliação do modulo de alimentação dinâmica - MAD

A Figura 76 mostra a variação da amplitude com o aumento da frequência para cada amplitude regulada. Note que para frequência mais baixas, a amplitude real é menor do que a regulada e, à medida que se aumenta a frequência, a amplitude também aumenta e atinge valores maiores do que o regulado. As linhas tracejadas representam o valor da amplitude regulada como referência.

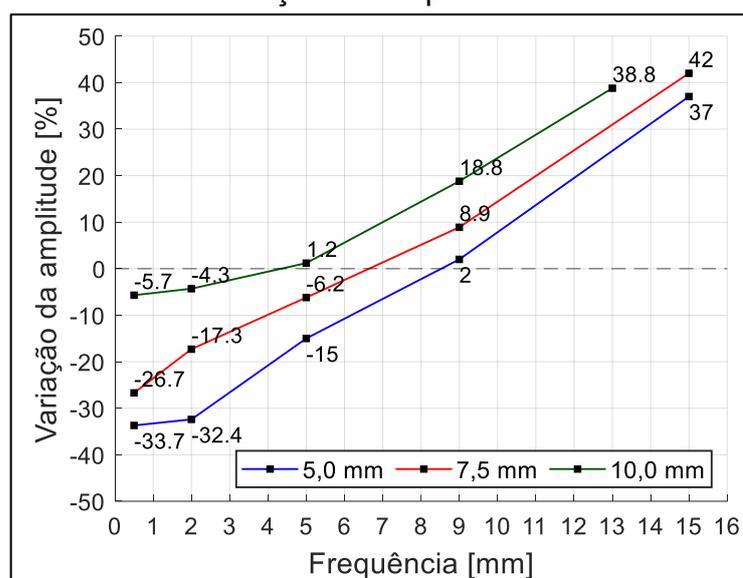
Figura 76 – Variação da amplitude de oscilação com a frequência. Amplitudes reguladas em 5,0, 7,5 e 10,0 mm.



Fonte: elaborado pelo autor.

A Figura 77 representa o valor percentual da variação da amplitude real em relação à regulada. Em frequências muito baixas, a variação chegou a patamares da ordem de 34 % e 27 % para as amplitudes de 5,0 e 7,5 mm. Para a amplitude de 10 mm a variação não foi tão acentuada. Por outro lado, nas frequências mais altas, para as três amplitudes reguladas, as variações foram elevadas, chegando ao patamar de 42 % para a amplitude de 7.5 mm e 39% para 10 mm.

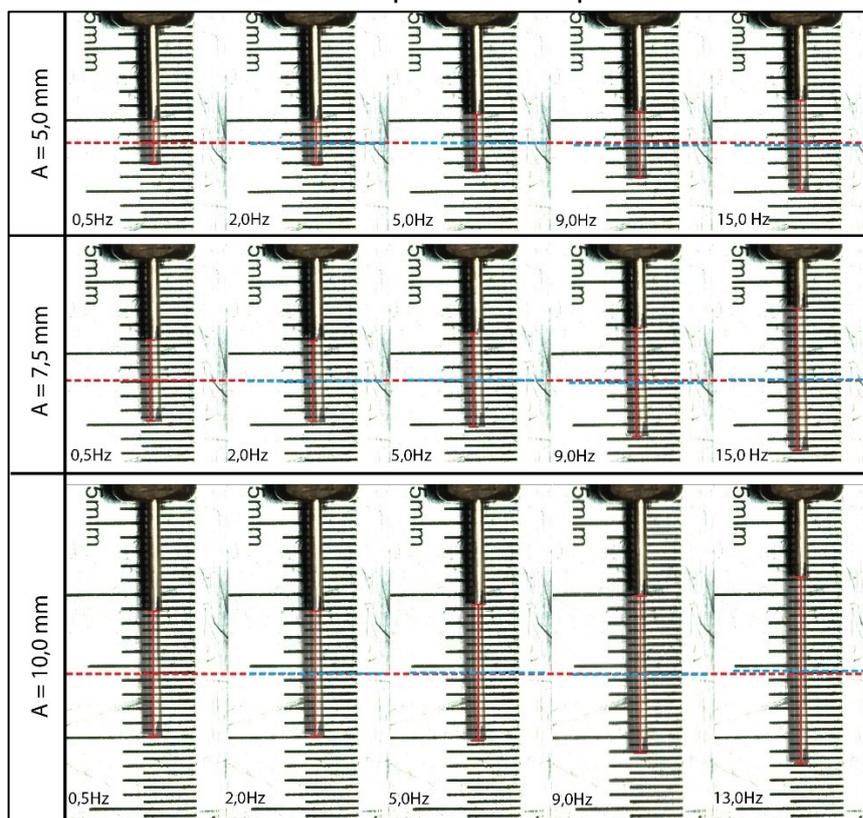
Figura 77 – Percentual de variação da amplitude com aumento da frequência.



Fonte: elaborado pelo autor.

Por fim, a Figura 78 mostra a sobreposição dos frames obtidos pelas filmagens em alta velocidade, nos limites da amplitude (avanço e recuo) para cada condição ensaiada. Note que a linha média da amplitude se manteve, sendo que os extremos variaram.

Figura 78 – Variação da amplitude com a frequências de oscilação. Frames nos limites da amplitude sobrepostos.



Fonte: elaborado pelo autor.

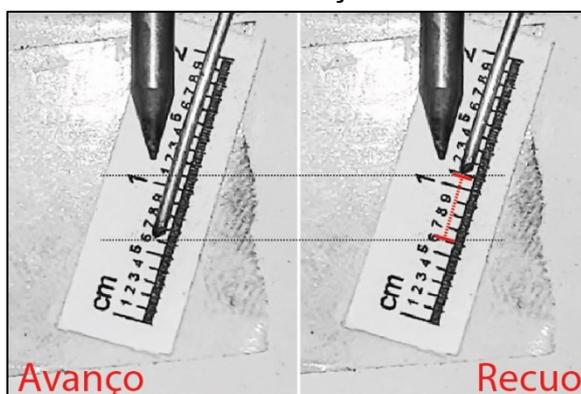
Uma hipótese para explicar este fenômeno se fundamenta na presença de folgas entre o conduíte e o arame, e no atrito entre eles. Uma vez que o MAD promove a oscilação do arame antes dele entrar pelo conduíte, quanto menor a frequência de oscilação, menor a velocidade com que o arame se desloca, conseqüentemente, maior é o atrito dinâmico entre a parede do conduíte e a superfície do arame, ou seja, maior é a resistência ao movimento do arame. Desse modo, à medida que o arame entra no conduíte, há uma força resultante impedindo que o mesmo avance pela guia, fazendo com que o volume das folgas seja preenchido pelo arame alimentado.

Já para frequências mais altas, o atrito dinâmico reduz, aliviando a resistência ao movimento do arame pelo conduíte e, conseqüentemente, as folgas são ultrapassadas com mais facilidade. Além disso, para frequências maiores, a força com que o bloco de roletes puxa e empurra o arame para dentro do conduíte é maior, fazendo com que o atrito estático, isto é, quando o arame está parado, seja facilmente “vencido”.

Entretanto, foi observado que a amplitude real ultrapassava o valor da amplitude regulada para as frequências mais elevadas. Isto sugere que o conduíte também atue como um “pulmão” (do inglês, *buffer*), e o comprimento de arame seja maior do que comprimento do conduíte, e fique “armazenado” nos volumes disponíveis pelas folgas.

A alternativa para compensar a variação da amplitude com a frequência, foi aferir a amplitude de oscilação para cada ensaio de soldagem. Este procedimento foi realizado com o recurso de *super slow-motion* de um aparelho *smartphone* modelo A715F da marca Samsung. Nesta configuração o aparelho permite filmagens em 240 fps com uma resolução de 1280x720 pixels. A Figura 79 mostra dois frames retirados de uma filmagem realizada com o *smartphone* para aferir a amplitude regulada.

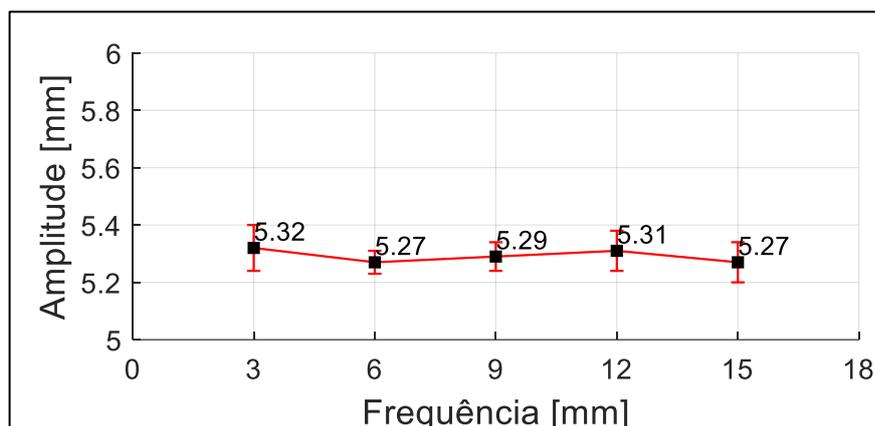
Figura 79 – Aferição da amplitude por meio do recurso *super slow-motion* (240 fps).
Limites de avanço e recuo.



Fonte: elaborado pelo autor.

O gráfico exposto na Figura 80 mostra os valores de amplitude obtidos através da análise de sinais adquiridos para diferentes frequências, onde a amplitude foi aferida pelo método descrito. Embora os valores medidos sejam diferentes dos 5 mm desejados, a média das amplitudes se manteve. Considerando as incertezas, não se pode afirmar que as medias são diferentes, dado que, em algum ponto, elas se cruzam dentro de um intervalo de tolerância. Assim sendo, o método mostrou-se assertivo e prático para regular e manter a amplitude igual para os ensaios onde variou-se a frequência de oscilação.

Figura 80 – Amplitudes médias obtidas via aquisição de sinais para as frequências de 3 à 15 Hz.

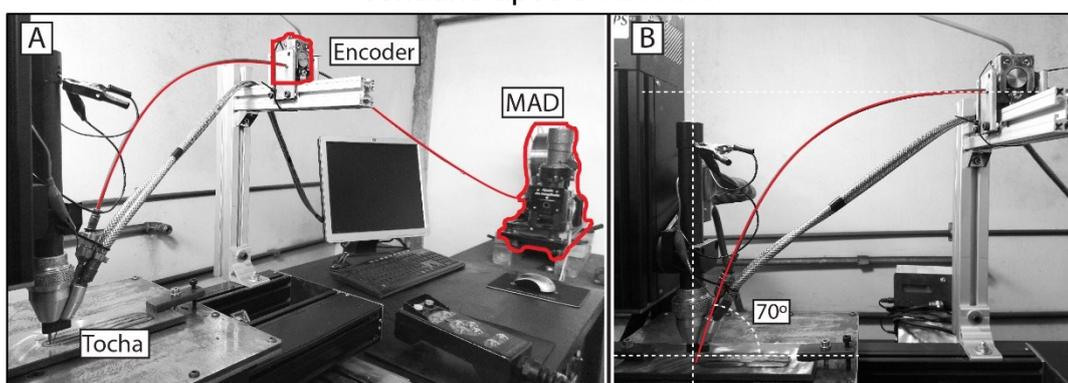


Fonte: elaborado pelo autor.

5.1.2 Avaliação do sistema de medição de velocidade de arame

Assim como nas variantes de processos MIG/MAG e TIG citadas na seção 3.2.1, no processo TIG com alimentação dinâmica de arame, a leitura da velocidade de arame deve ser feita o mais próximo possível da tocha de soldagem, de modo que as influências de curvas e folgas do conduíte sejam minimizadas na leitura do sinal. No presente trabalho, devido à disposição da bancada, o *encoder* foi fixado numa região intermediária do conduíte, entre a tocha e o módulo de alimentação dinâmica (Figura 81).

Figura 81 – Disposição da bancada. A) Posição do *encoder*; B) Curvatura do conduíte após o *encoder*.



Fonte: elaborado pelo autor.

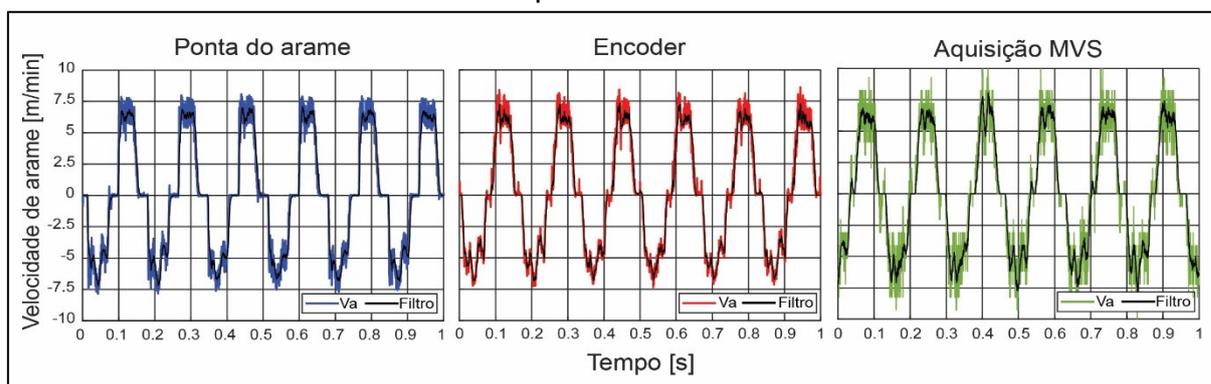
Vale ressaltar que o sistema utilizado não é do tipo *push-pull*, e tanto a alimentação quanto a oscilação do arame são controladas pelo MAD. Para reduzir as influências das folgas e atrito na passagem do arame pelo conduíte, este foi esticado ao máximo entre o alimentador de arame e o *encoder*. Já na região entre o *encoder* e a tocha de soldagem, para que o conduíte pudesse ser acoplado no bocal direcionador, houve a necessidade de elevar a posição do *encoder*. A curva de aproximadamente 70° faz com que o arame entre no bocal direcionador com mesmo ângulo de alimentação (20° em relação ao eixo do eletrodo), o que minimiza qualquer resistência que o arame possa ter na região de engate, facilitando a oscilação do metal de adição.

Idealmente, o melhor arranjo de bancada seria o que dispusesse o conduíte na forma mais linear possível. Entretanto, as dimensões físicas e peso do módulo de alimentação dinâmica impossibilitaram tal configuração. Dentre as possíveis disposições da bancada, a configuração mostrada na Figura 81 foi a que apresentou melhor “alimentabilidade” do arame.

Para validar o método de medição da velocidade de arame, conduziu-se as medições de velocidades por meio das filmagens em alta velocidade e aquisição de dados, conforme descritas na seção 4.6.1.

A Figura 82 representa as velocidades de arame medidas através da ferramenta *tracking point* (TP) para a ponta do arame e para o rolete do *encoder*, além da VA adquirida pelo MVS. Ademais, as curvas coloridas representam o sinal sem tratamento, enquanto as linhas pretas representam os sinais filtrados (filtro exponencial de primeira ordem) para redução de ruídos.

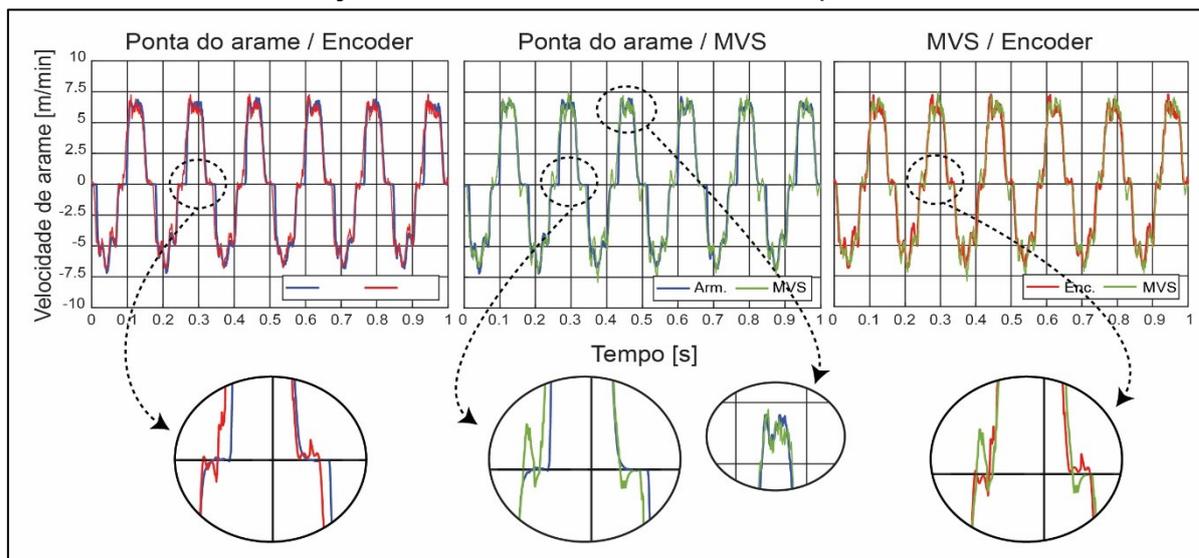
Figura 82 – Gráficos das velocidades medidas via filmagem em alta velocidade e aquisição de dados. Frequência e amplitude de oscilação de arame em 6Hz e 5 mm respectivamente.



Fonte: elaborado pelo autor.

Os gráficos mostrados na Figura 83 sobrepõe as velocidades filtradas. Nos detalhes em destaque, é possível notar que tanto a velocidade adquirida pelo MVS (verde) quanto a filmagem do bloco do encoder (vermelho), apresentam um comportamento diferente da velocidade medida na ponta do arame (azul) quando ocorre a inversão do movimento, isto é, quando a VA é igual a zero. No gráfico referente à ponta do arame, na inversão do sentido, o arame permanece parado por alguns instantes. Entretanto, nos sinais adquiridos pelo encoder, a curva apresenta picos e vales oscilando entre valores positivos e negativos durante este mesmo período. Já nas regiões de pico das curvas, que representam as velocidades máximas atingidas no ciclo (detalho ao centro da Figura 83), os comportamentos dos três sinais foram semelhantes e as velocidade de pico bastante próximas.

Figura 83 – Gráficos das velocidades filtradas sobrepostas. Frequência e amplitude de oscilação de arame em 6Hz e 5 mm respectivamente.

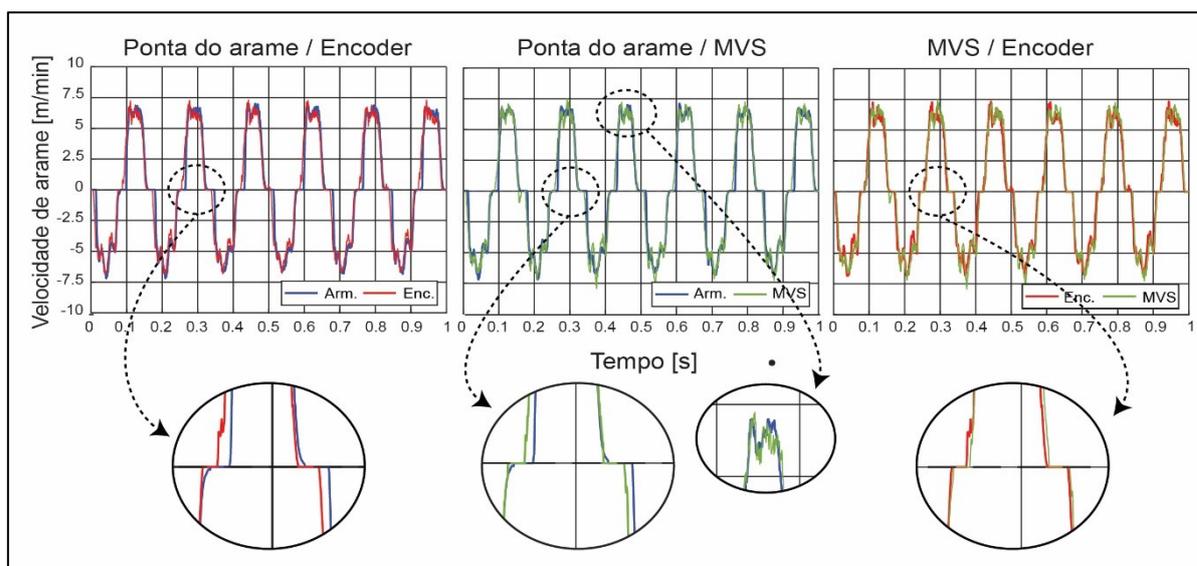


Fonte: elaborado pelo autor.

Os picos e vales apresentados pelos sinais aquirisado no *encoder*, foram atrelados às vibrações do sistema. Como mostrado na Figura 81, mesmo que MAD fora posicionado em outra mesa, a vibração do módulo associada à vibração do conduíte acaba sendo transferida até o *encoder*. Vale lembrar que o *encoder* apresenta uma resolução de 8192 PPR (0,0086 mm por pulso), logo, pequenas vibrações são facilmente detectadas pelo sensor.

A maneira adotada para atenuar tais ruídos na inversão do movimento, foi o tratamento dos sinais do MVS pelo software MATLAB. Nos detalhes destacados na Figura 84 vê-se as velocidades após o pós-processamento que, neste caso, consiste em filtrar as oscilações entre velocidades positivas e negativas reduzindo os “ruídos” oriundo da vibração do sistema durante a inversão do movimento.

Figura 84 - Gráficos das velocidades pós-processadas sobrepostas. Frequência e amplitude de oscilação de arame em 6Hz e 5 mm respectivamente.

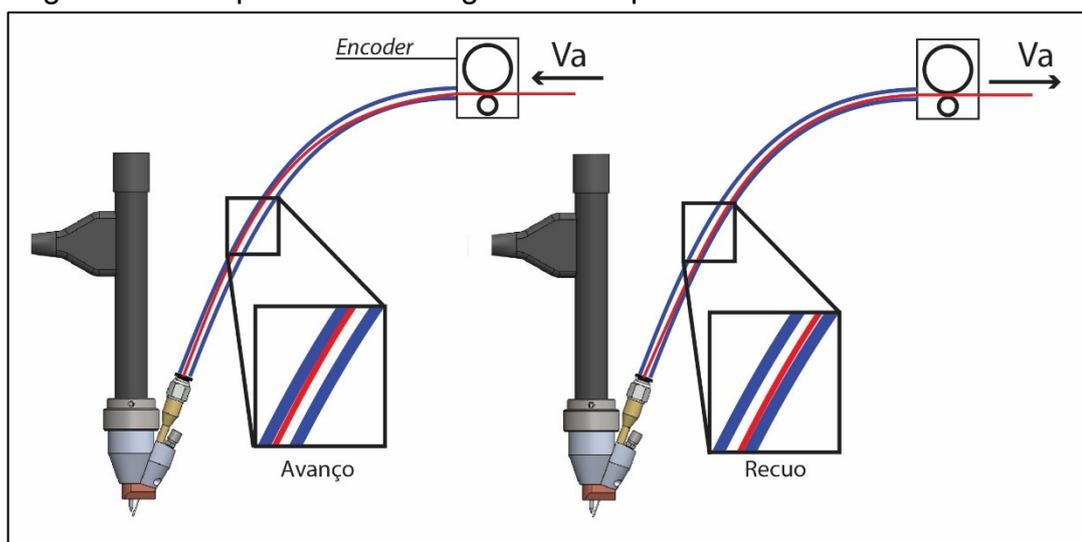


Fonte: elaborado pelo autor.

Embora mesmo que com o pós-processamento os sinais apresentem os períodos em que a VA é nula durante a inversão do sentido de oscilação, configurando o comportamento da ponta do arame, nota-se que no início da rampa de aceleração, tanto para VA positiva quanto negativa, os sinais do MVS e *encoder* antecipam o da ponta do arame. Este comportamento está diretamente relacionado à folga entre o arame e conduíte.

Conforme representado na Figura 85, os mecanismos de contato entre o arame e conduíte apresentam forte influência sobre o comportamento oscilatório da ponta do arame na saída da tocha. Enquanto o arame não tiver como anteparo as paredes do conduíte, ele terá o avanço reduzido na saída da tocha, isto é, o arame só sairá do conduíte quando “vencer” a folga existente. Durante o avanço, note que o arame está em contato com a parede superior do conduíte, enquanto no recuo, é a parede inferior.

Figura 85 – Esquemático da folga entre as paredes do conduíte e o arame.



Fonte: elaborado pelo autor.

Entretanto, mesmo que a ponta do arame não tenha se deslocado, o comprimento de material relativo à folga passou pelo rolete do encoder, o que representa a subida antecipada da curva mostrada nos detalhes da Figura 84. Logo, quanto maior forem as folgas entre as partes, maior será a defasagem da subida da velocidade de arame lida pelo MVS e esta não representará o comportamento real do arame na ponta da tocha. A folga encontrada para cada frequência avaliada é mostrada na Tabela 17.

Tabela 17 –Folga entre arame e conduíte avaliada pelos sinais do MVS e leitura na ponta do arame.

Frequência	6 Hz	9 Hz	12 Hz	Média
Folga	$0,11 \pm 0,05$	$0,14 \pm 0,03$	$0,16 \pm 0,07$	$0,13 \pm 0,09$

Os valores de folga foram levados em consideração para cálculo de variáveis tais como amplitude de avanço (A_{AV}), amplitude de recuo (A_R), mergulho do arame (M) e recuo em ponte (R_P), utilizadas para a caracterização do processo.

Por fim, a validação do sistema foi realizada em três frequências de oscilação do arame: 6, 9 e 12 Hz. Os valores de velocidades médias e de pico para o avanço e recuo são mostrados na Tabela 18.

Tabela 18 – Velocidades médias e de pico de avanço e recuo para sinais aqisitados via MVS e filmagens em *tracking point*.

Freq.	Medição	Va média Avanço (m/min)	Va média Recuo (m/min)	Va Pico Avanço (m/min)	Va Pico Recuo (m/min)
6 Hz	TP arame	4,91 ± 0,04	4,58 ± 0,10	6,97 ± 0,24	6,91 ± 0,32
	MVS	4,94 ± 0,16	4,64 ± 0,11	7,11 ± 0,28	7,05 ± ,034
	TP Encoder	4,96 ± 0,26	4,67 ± 0,16	7,09 ± 0,22	6,95 ± 0,29
9 Hz	TP arame	7,73 ± 0,18	7,72 ± 0,16	12,39 ± 0,25	12,88 ± 0,34
	MVS	7,70 ± 0,25	7,65 ± 0,17	12,49 ± 0,28	12,78 ± 0,37
	Encoder	7,65 ± 0,21	7,67 ± 0,23	12, 35 ± 0,25	12, 84 ± 0,28
12 Hz	TP arame	10,46 ± 0,53	12,12 ± 0,29	18,46 ± 0,32	19,67 ± 0,58
	MVS	10,40 ± 0,55	12,03 ± 0,36	18,70 ± 0,46	20,23 ± 0,62
	TP Encoder	10,48 ± 0,89	11,96 ± 0,26	18,88 ± 0,27	19,57 ± 0,61

É importante ressaltar que embora a leitura pelo MVS esteja graficamente sobreposta ao sinal da ponta do arame, estes não estavam sincronizados durante a realização do ensaio, logo, as leituras não correspondem ao mesmo período de oscilação. A não sincronidade dos sinais aferiu uma pequena diferença dos valores médios e de pico medidos.

Embora as médias associadas aos desvios padrões apresentados pelas amostras estejam equivalentes dentro de um intervalo, para comparar o método e validar a medição pelo MVS aplicou-se a análise de variância (ANOVA) entre as amostras. A análise foi feita tendo como referência a filmagem em alta velocidade, a qual representa mais fielmente, o comportamento da ponta do arame. A Tabela 19 mostra as velocidades médias de cada ciclo da oscilação do arame para as amostras aqisitadas pelo MVS e pela filmagem da ponta do arame.

Tabela 19 – Análise de variância (ANOVA) entre as médias das velocidades de avanço e recuo aquisitadas pelo MVS e pela filmagem da ponta do arame.
Frequência de oscilação do arame: 6 Hz.

	TP Arame	MVS
	4,91	4,95
	4,88	5,06
Velocidades médias de AVANÇO para cada ciclo da amostra	4,92	4,84
	4,93	4,91
	4,91	5,00
	4,89	4,89
Média	4,91	4,94
Desv. Padrão	0,02	0,08
<i>p-value</i> (ANOVA)		0,33
	4,52	4,55
	4,65	4,65
Velocidades médias de RECUO para cada ciclo da amostra	4,55	4,68
	4,64	4,58
	4,56	4,70
	4,57	4,65
Média	4,58	4,64
Desv. Padrão	0,05	0,06
<i>p-value</i> (ANOVA)		0,12

O método ANOVA pode ser avaliado a partir dos coeficientes *p-value*. Ambas as amostras, tanto para avanço quanto para recuo, mostraram valores de *p-value* maiores do que 0,05, isto é, com um grau de significância de 95 %, não há evidências suficiente para concluir que as amostras são diferentes.

O mesmo teste foi realizado para as frequências de 9 e 12 Hz. Os *p-values* de cada teste são mostrados Tabela 20.

Tabela 20 - Análise de variância (ANOVA) entre as médias das velocidades de avanço e recuo adquiridas pelo MVS e TP arame. Frequência de oscilação do arame: 9 e 12 Hz.

AVANÇO	9 Hz		12 Hz	
	TP Arame	MVS	TP Arame	MVS
Média	7,73	7,70	10,46	10,40
Desv. Padrão	0,09	0,13	0,28	0,29
p-value	0,69		0,63	
RECUO	9 Hz		12 Hz	
	TP Arame	MVS	TP Arame	MVS
Média	7,72	7,65	12,12	12,03
Desv. Padrão	0,08	0,10	0,15	0,17
p-value	0,19		0,27	

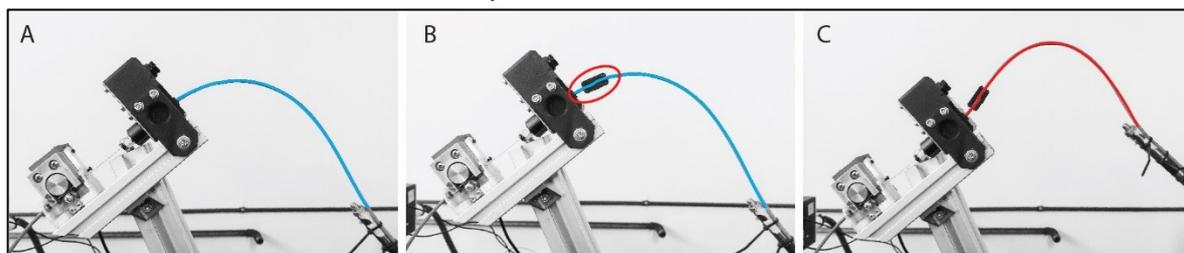
A análise estatística pelo método ANOVA mostrou que, para as três frequências analisada, não há diferença significativa (todos os *p-values* maiores do que 0,05) entre as médias. Logo, a medição da velocidade de arame com o MVS e o pós-processamento de dados aplicado, demonstraram-se, estatisticamente, válidos para o monitoramento do processo em questão.

5.1.3 Avaliação do Módulo oscilador de conduíte – MOC

Após a montagem da segunda bancada, conforme mostrado na Figura 36 da seção 4.1, onde trocou-se de oscilador de arame do MAD para o MOC, a amplitude de oscilação do arame na saída da tocha também não conferia com o valor nominal do disco excêntrico.

A primeira configuração avaliada foi com o conduíte livre, simplesmente acoplado ao MOC, conforme mostra a Figura 86 A. Neste arranjo, a amplitude de oscilação do arame na saída a tocha, aferida com o smartphone no modo *super slow-motion* (seção 5.1.1), foi bem menor do que 5 mm (disco excêntrico).

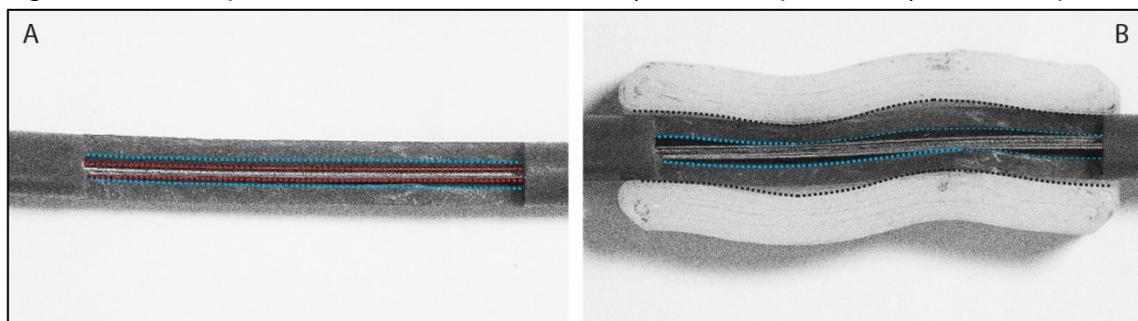
Figura 86 - Configuração de conduíte avaliadas. A) Livre. B) Acoplador. C) Acoplador + Curvatura.



Fonte: elaborado pelo autor.

Diferente do MAD, que atua diretamente no arame, para o MOC, o que promove a transferência do movimento oscilatório do conduíte para o arame é o atrito entre as partes. Se não há resistência entre a parede do conduíte e a superfície do arame, menos eficaz será a transferência de movimento por atrito. Neste sentido, projetou-se um dispositivo que promovesse certo “acoplamento” entre o arame e o conduíte por interferência mecânica, a fim de aumentar o coeficiente de atrito entre a parede do conduíte e arame. A Figura 86 B mostra o posicionamento do acoplador antes da entrada do conduíte no MOC. Já A Figura 87 mostra como a deformação do conduíte provocada pelo acoplador altera o contato com o arame, aumentando o atrito entre as partes.

Figura 87 – Acoplamento conduíte-arame. A) Sem acoplador. B) Com acoplador.



Fonte: elaborado pelo autor.

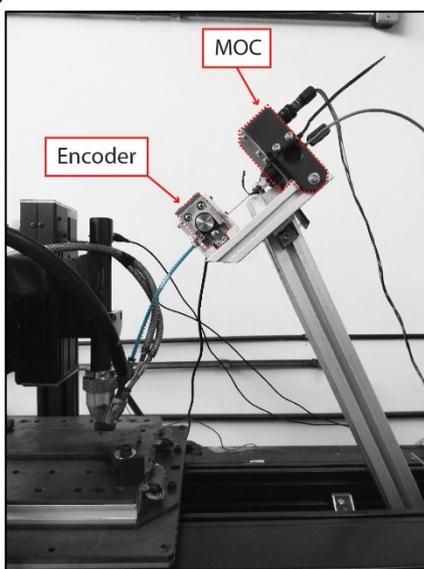
Além do acoplador, foi forçada a curvatura de entrada do conduíte no MOC, conforme mostra a Figura 86 C. O resultado das medições das amplitudes é mostrado na Tabela 21. Para esta análise, os dados aquisitados de velocidade de arame foram pós-processados no software MATLAB, uma vez que o sistema de medição de velocidade de arame já estava validado (seção 5.1.2). A Figura 88 mostra o

posicionamento do *encoder* logo após o MOC, e o comprimento e curvatura do conduíte até a tocha de soldagem, bastante minimizadas. Este arranjo só foi possível pois as dimensões e peso do MOC permitiram que o dispositivo pudesse ser posicionado bastante próximo da tocha.

Tabela 21 – Variação da amplitude para diferentes condições de conduíte e frequências. Amplitude nominal do disco excêntrico: $A = 5\text{mm}$.

Frequência (Hz)	Livre	Acoplador	Acoplador / Curva
5	$2,46 \pm 0,02$	$4,79 \pm 0,01$	$4,83 \pm 0,02$
10	$2,47 \pm 0,06$	$4,82 \pm 0,08$	$4,85 \pm 0,05$
15	$2,52 \pm 0,04$	$4,92 \pm 0,07$	$4,95 \pm 0,05$
20	$2,76 \pm 0,05$	$4,93 \pm 0,04$	$4,96 \pm 0,04$

Figura 88 - Disposição do *encoder* e do MOC na bancada de ensaios.



Fonte: elaborado pelo autor.

De acordo com os dados da Tabela 21, nota-se que a condição de conduíte livre apresenta pouca transferência de movimento para o arame. Para as frequências de 5,0, 10,0 e 15,0 Hz as amplitudes medidas foram, aproximadamente, 50 % menores do que a amplitude nominal do excêntrico (5 mm). Já para o segundo caso, a presença do acoplador aumentou o coeficiente de atrito entre as partes e a transferência do movimento foi muito mais eficaz do que na condição de conduíte livre. Para a frequência de 5 Hz, a amplitude medida foi aproximadamente 4 % menor que valor nominal, enquanto para 20 Hz, foi apenas 1,4 % menor.

Por fim, a condição com acoplador e curvatura forçada do conduíte mostrou um resultado ligeiramente melhor, reduzindo estes valores para 3,4 % e 1,0 % para 5 e 20 Hz respectivamente.

Assim como no MAD, a amplitude de oscilação também aumentou com o aumento da frequência, entretanto, a variação foi de pequena magnitude. Embora neste caso a amplitude não possa ser ajustada para cada frequência regulada, uma vez que é necessário a troca do disco excêntrico, o resultado da oscilação do arame pelo MOC se mostrou mais constante. Neste caso, não houve compensação nem regulagem da amplitude para cada frequência conforme realizado nos ensaios utilizando o MAD.

5.2 Sobre a velocidade de arame

A alimentação dinâmica oscilante é caracterizada pela oscilação longitudinal do arame com amplitude e frequência definidas. Neste caso, a velocidade do arame é caracterizada por uma associação de duas componentes: a velocidade oscilatória (VA_{OSC}), promovida pelo módulo de oscilação, e a velocidade de alimentação constante (VA_{CTE}), a qual é regulada na fonte de soldagem (equação (27)).

$$VA = VA_{OSC} + VA_{CTE} \quad (27)$$

A velocidade oscilatória é caracterizada pela seguinte função sinusoidal:

$$VA_{OSC} = A \cdot \pi \cdot f \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t) \quad (28)$$

logo,

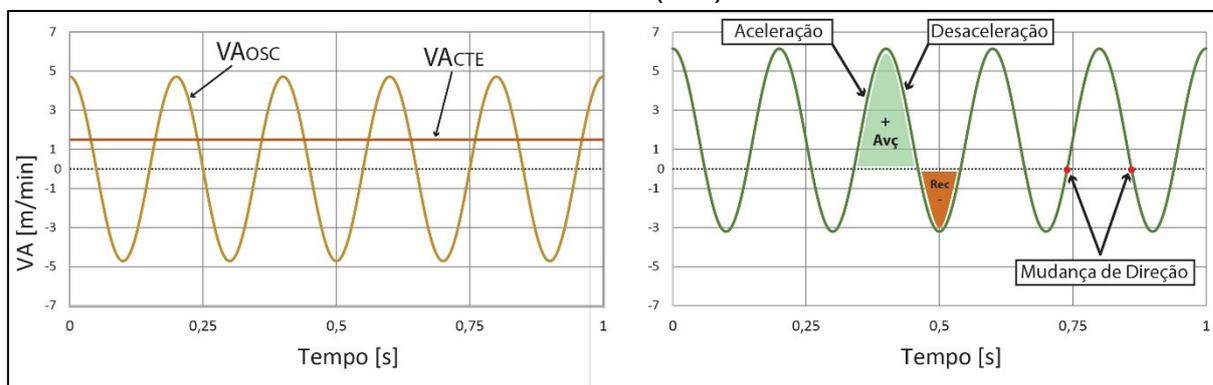
$$VA = \frac{A \cdot \pi \cdot f \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t)}{16.67} + VA_{CTE} \quad (29)$$

onde A (mm) é a amplitude de oscilação, f (Hz) é a frequência de oscilação, e t (s) é o tempo.

A Figura 89 representa esquematicamente as velocidades de arame discriminadas, à esquerda, e a VA resultante, à direita. O cenário hipotético representa

a oscilação do arame com frequência de 5 Hz, amplitude de 5 mm e velocidade de alimentação de 1,5 m/min.

Figura 89 – Componentes da velocidade de arame. (Esq.) VA oscilatório e Va constante discriminadas. (Dir.) VA resultante.



Fonte: elaborado pelo autor.

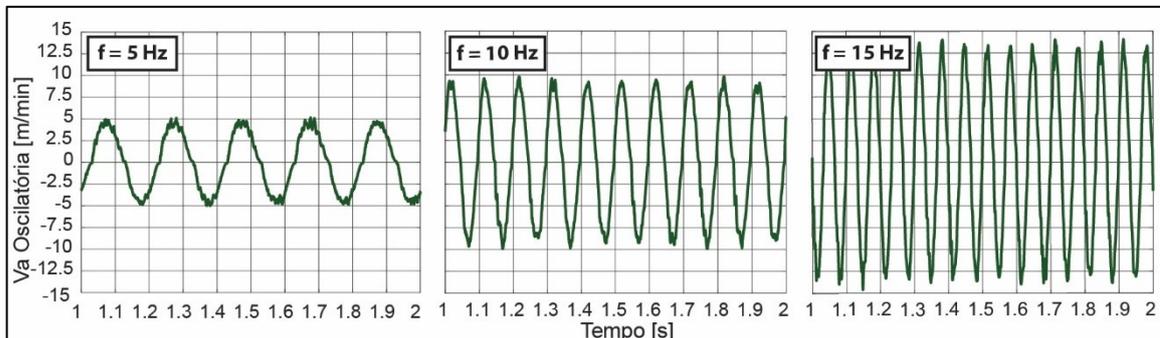
Por convenção, velocidades positivas representam o movimento de avanço do arame, o que significa que o arame se desloca em direção à poça de fusão. Já valores negativos, representam o movimento de recuo, isto é, quando o arame se afasta da poça de fusão. Cada movimento é caracterizado por um período de aceleração e desaceleração com velocidades de pico para cada direção. Quando o arame atinge velocidade nula (0 m/min), significa que houve a mudança na direção do movimento.

Considerando a componente oscilatória, visto a natureza sinusoidal do movimento, as velocidades de avanço e recuo são iguais, e a velocidade média é igual à zero. Quando a componente de velocidade de alimentação constante é somada, a velocidade de avanço resultante é maior do que a velocidade de recuo. Neste caso, a velocidade média resultante é positiva e tem o mesmo valor que a velocidade regulada na fonte de soldagem, o que significa que o arame está sendo alimentado ao processo. Assim sendo, a velocidade média de alimentação é definida apenas pela componente constante da VA, enquanto a componente oscilatória define os movimentos de avanço e recuo do arame.

Dada a equação (29), a componente oscilatória varia em função da frequência e da amplitude regulada. Embora a VA média seja mantida, as velocidades máximas e médias de avanço e recuo variam. A Figura 90 mostra a componente oscilatória da VA aquisitada para testes conduzidos com frequências de 5,0, 10,0 e 15,0 Hz e 5mm

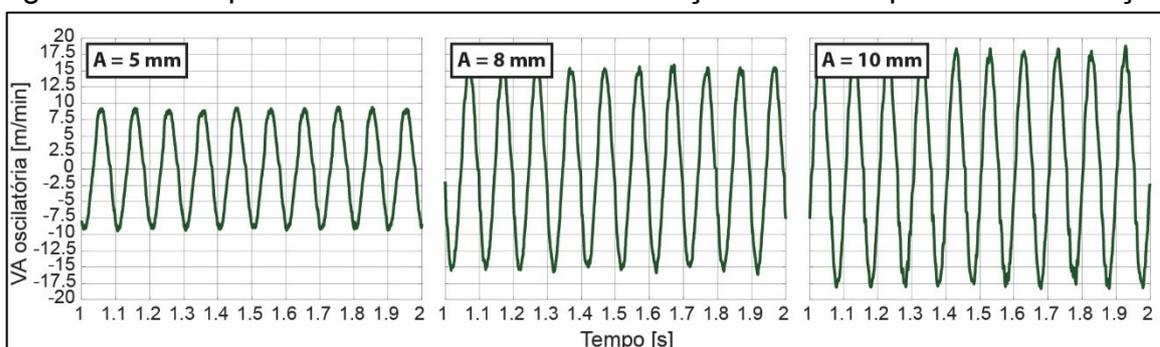
de amplitude. Já a Figura 91 mostra componente oscilatória para amplitudes de 5,0, 8,0 e 10,0 mm com frequência de 10 Hz.

Figura 90 – Componente oscilatória da VA. Variação com a frequência de oscilação.



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 91 - Componente oscilatória da VA. Variação com a amplitude de oscilação.

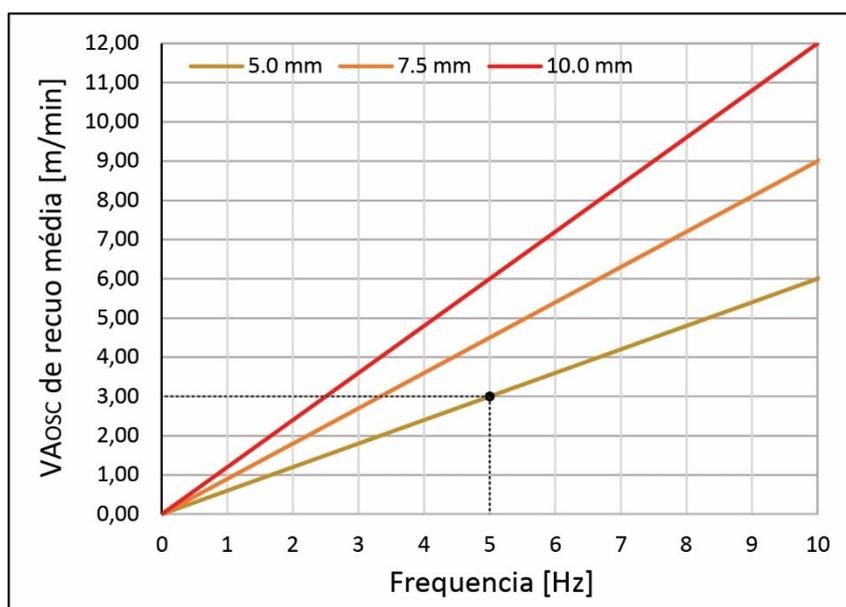


Fonte: elaborado pelo autor.

Visto que as velocidades médias de avanço e recuo dependem das regulagens de frequência e amplitude de oscilação, existem combinações destes parâmetros as quais não promoverão uma alimentação dinâmica efetiva, isto é, a adição de material à poça de fusão não será adequada. Ainda considerando a equação (29), se a componente VA_{CTE} for maior do que a velocidade média de recuo da VA_{OSC} , a VA resultante será sempre positiva, o que significa que o movimento de recuo do arame não ocorrerá. Neste sentido, para cada combinação de frequência e amplitude, haverá uma velocidade de alimentação máxima regulável a qual ainda promoveria o recuo do arame, caracterizando a alimentação dinâmica oscilatória. Em outras palavras, para cada velocidade de alimentação regulada, haverá uma frequência (e amplitude) mínima para que haja o movimento de recuo.

A Figura 92 mostra a velocidade média de recuo (teórica) para diferentes frequências e amplitudes reguladas. As áreas abaixo das curvas de cada amplitude representam níveis de velocidade de alimentação de arame os quais promoveriam uma alimentação dinâmica efetiva, visto que a velocidade de recuo do arame é superior à velocidade de alimentação regulada na fonte. Por exemplo, para uma frequência de 5 Hz e amplitude de oscilação de 5 mm, a máxima velocidade de alimentação regulável, que ainda possibilitaria o recuo do arame, seria de 3 m/min. Velocidades acima das curvas caracterizariam a alimentação dinâmica pulsada, isto é, sempre positiva, porém com níveis diferentes.

Figura 92 – Relação de velocidade média de recuo e frequência de oscilação do arame.



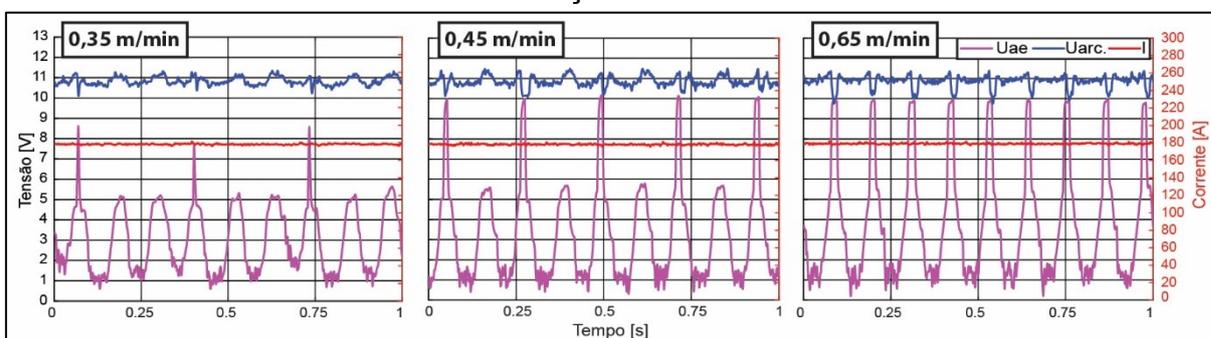
Fonte: elaborado pelo autor.

No entanto, apenas a regulagem de uma velocidade de alimentação que esteja abaixo dos limites mostrados na Figura 92, não garante um procedimento robusto. Embora no processo GTAW haja a independência de ajuste entre a corrente de soldagem e a velocidade de alimentação, na alimentação dinâmica existem limites operacionais relacionados aos parâmetros de alimentação do arame (VA, frequência e amplitude). Consideremos um nível de energia de arco. Se a velocidade de alimentação regulada for muito baixa, embora a oscilação do arame seja de fato atingida, a transferência metálica pode não ocorrer a cada ciclo da alimentação

dinâmica. Isto porque a taxa de fusão prevalece sobre a taxa de alimentação, e uma pequena gota se formaria na ponta do arame.

A Figura 93 mostra oscilogramas de tensão e corrente de três experimentos realizados com a mesma corrente de soldagem (180 A) porém com diferentes níveis de velocidade de alimentação de arame (0,35, 0,45, 0,65 m/min). Como pode ser visto nos sinais de U_{AE} , para a velocidade de 0,35 m/min, foram necessários três ciclos de oscilação para que ocorresse a transferência de uma gota. Para 0,45 m/min, foram necessários dois ciclos para que a ponte metálica fosse estabelecida, enquanto para 0,65 m/min, a transferência metálica passou a ocorrer em cada ciclo de oscilação do arame.

Figura 93 - Oscilogramas de UARC, UAE e Corrente para diferentes velocidades de alimentação de arame.



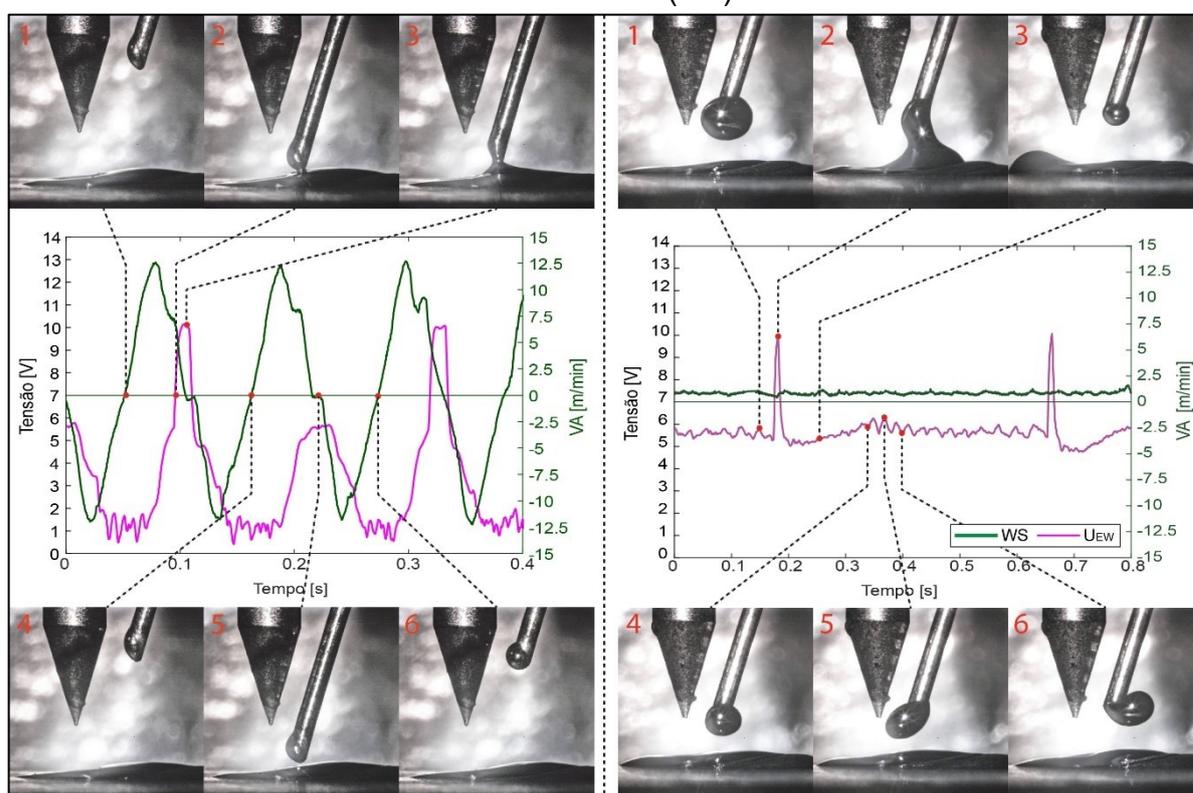
Fonte: elaborado pelo autor.

Embora para a velocidade de 0,45 m/min a transferência metálica não tenha ocorrido a cada ciclo, pode-se dizer que o processo ainda se manteve estável. Conforme pode ser visto na Figura 94 à esquerda, no primeiro ciclo de oscilação (quadros 1, 2 e 3) houve a transferência de material à poça de fusão. Já para o segundo ciclo (quadros 4, 5 e 6), embora o arame avance, a ponte metálica não é estabelecida, e uma pequena gota se formou na ponta do arame, a qual foi transferida no ciclo seguinte. Neste caso, embora a velocidade de alimentação fosse baixa, a velocidade média de avanço foi da ordem de 7,2 m/min, aproximadamente 16x maior que a VA média, enquanto a velocidade de pico chegou a patamares próximos à 12,5 m/min, o que corresponde à 27x a VA média. A elevada velocidade com que o arame percorre o arco elétrico, faz com que a taxa de fusão não seja acentuada, uma vez que o período durante o qual o arame está submetido ao calor do arco é reduzido. Isto evita, ou ameniza, a formação de uma gota grosseira na ponta do arame, tornando a

transferência metálica mais regular e controlada. Este fenômeno fora observado também por Silva et al. [36].

Já para a alimentação convencional (Figura 94 à direita), a baixa velocidade de alimentação de arame faz com que a taxa de fusão prevaleça sobre a taxa de alimentação. Desse modo, à medida que o metal de adição avança e é submetido ao calor do arco, uma gota grosseira se forma na ponta do arame, a qual, devido às forças eletromagnéticas e ao jato de plasma, inicia um movimento rotacional e descontrolado, aumentando o risco de contaminação do eletrodo.

Figura 94 – Oscilogramas de U_{AE} e VA (0,45 m/min) e frames obtidos por filmagem em alta velocidade para procedimento com alimentação dinâmica (esq.) e convencional (dir.).



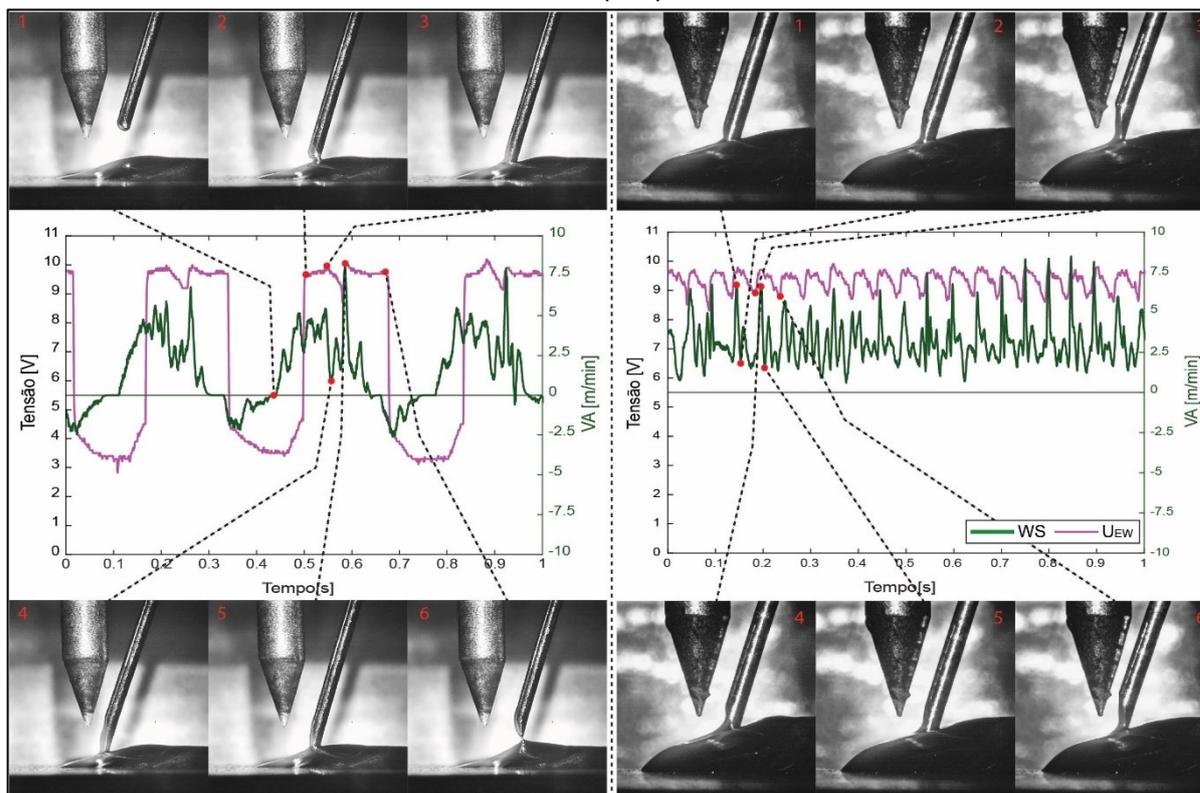
Fonte: elaborado pelo autor.

Por outro lado, velocidades de alimentação muito altas também podem levar a uma transferência metálica instável. Durante o movimento de avanço, o mergulho do arame, descrito na seção 4.8, é maior para velocidades de arame mais elevadas e para frequências menores (maiores detalhes sobre isto serão discutidos nas seções seguintes). Em casos extremos, o arame acaba colidindo-se com o metal sólido no

fundo da poça. Este evento é conhecido pelo termo em inglês *stutting*, o qual também será utilizado ao longo deste trabalho.

A Figura 95 mostra duas condições em que ocorreu *stutting*. À esquerda, apresenta-se o oscilograma de um ensaio realizado com alimentação dinâmica à 3 Hz, amplitude de 5 mm e velocidade de alimentação de arame de 1,6 m/min. Após o contato do arame com a poça metálica (Quadro 2) o arame inicia a etapa de mergulho. Entretanto, ao colidir com o fundo da poça (Quadro 3), a VA sofre uma queda abrupta, bem como a U_{AE} . Neste momento, o arame é forçado a desviar sua trajetória aproximando-se do eletrodo (Quadro 4). Em seguida, no Quadro 5, a velocidade de arame apresenta um pico, o qual pode ser explicado da seguinte maneira: uma vez que o arame se choca com o fundo da poça, ao invés de flambar, certo volume de material é acumulado dentro do conduíte, armazenando energia potencial elástica. Quando a velocidade é reduzida, a taxa de fusão prevalece à taxa de alimentação, e o arame é fundido à poça, e ao mesmo tempo perde a rigidez, inibindo a resistência imposta ao movimento. Neste momento, a energia acumulada dentro do conduíte provoca o avanço repentino, resultando no pico da velocidade de arame como mostrado no Quadro 5. Além disso, a própria desaceleração do arame devido ao movimento oscilatório, contribui para aliviar a energia acumulada.

Figura 95 – Oscilogramas de U_{AE} e VA em condição de *stutting* para AD (esq.) e AC (dir.).



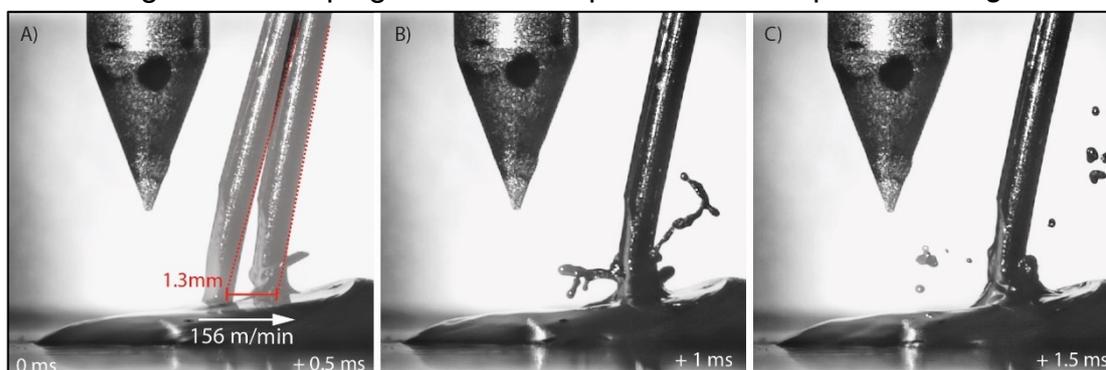
Fonte: elaborado pelo autor.

Embora a presença do *stutting* cause instabilidades no processo, até certo nível ele pode ser absorvido. Entretanto, na alimentação convencional este fenômeno pode ser mais severo, visto que não há redução da velocidade de arame, sobretudo recuo do arame, como na alimentação dinâmica. Ainda na Figura 95 (à direita) o mesmo comportamento da VA, de apresentar uma redução seguida de pico quando ocorrem as colisões do arame, pode ser visto no oscilograma para alimentação convencional. Neste caso foi utilizado uma velocidade de alimentação de 2,8 m/min, e a frequência do *stutting* é bem mais elevada do que para o caso à esquerda, que ocorre em sincronia com a frequência de oscilação do arame.

Em ambos os casos, a velocidade de pico provocada pelo alívio do arame chegou a patamares próximos à 8 m/min. Além disso, o deslocamento lateral do arame pode levar a geração de respingos conforme mostra a Figura 96. No Quadro (A), foram sobrepostos dois *frames* da filmagem em alta velocidade, com intervalo de 0,5 ms entre eles. Neste período, o arame desloca-se lateralmente aproximadamente 1,3 mm, o que resulta em um movimento com velocidade de 2600 mm/s (156 m/min). Os

quadros seguintes (B e C), mostram a formação dos respingos oriundos da poça metálica provocados pelo movimento brusco do arame.

Figura 96 -Respingos de metal líquido causados pelo *stubbying*.



Fonte: elaborado pelo autor.

As considerações sobre a velocidade de alimentação de arame e os limites operacionais do processo TIG AD descritas, foram levantadas a partir dos ensaios realizados para definição da velocidade de alimentação de arame utilizada nos ensaios de soldagem.

Conforme descrito na seção 4.9.1, os limites inferiores e superiores foram definidos pela estabilidade da transferência metálica. A Figura 93 mostrou que a transferência metálica ocorreu a cada ciclo de oscilação do arame partir de uma velocidade de alimentação regulada em 0,65 m/min. Neste caso, o limite inferior para a alimentação dinâmica ficou definido em 0,70 m/min. À medida que a velocidade de arame foi aumentando, ao atingir o valor de 1,8 m/min, iniciaram-se os choques de arame solido no fundo da poça. Assim sendo, a limite superior foi definido em 1,7 m/min.

Já para o caso de alimentação convencional, o limite inferior foi definido pela transferência em ponte intermitente. A velocidade de 1,2 m/min resultou em transferência intermitente, logo o limite inferior ficou definido em 1,3 m/min. Já o superior ficou em 2,2 m/min, e a partir de então, iniciaram as ocorrências de *stubbying*.

5.3 Ensaios de soldagem

5.3.1 Variação da frequência de oscilação do arame – MAD

Um dos principais parâmetros reguláveis na alimentação dinâmica de arame é a frequência de oscilação do arame. Nesta série de ensaios, o objetivo foi avaliar como este parâmetro influencia no comportamento dos parâmetros indiretos (definidos na seção 4.8) bem como na geometria do cordão.

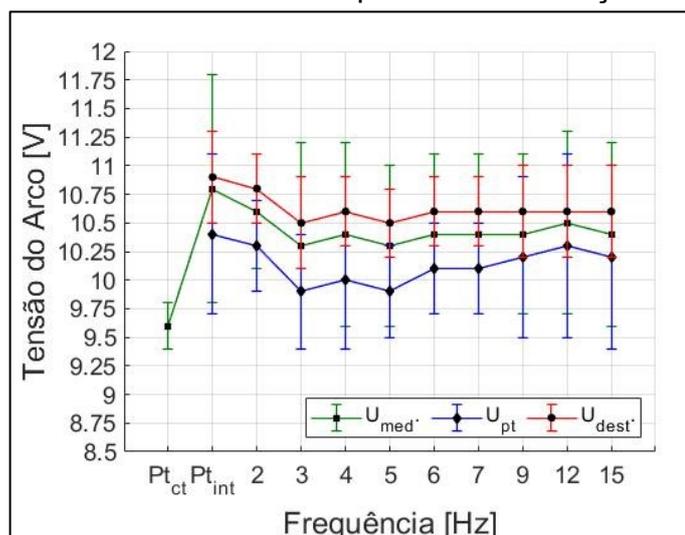
A Tabela 22 mostra os valores médios da corrente, tensão e potência do arco, bem como a velocidade média do arame. Uma vez que o processo TIG se dá por meio do controle da corrente, esta se manteve constante com médias praticamente iguais entre todos os ensaios (180 A). Assim como a I_{ARC} , a VA_{med} também se mostrou constante entre os ensaios, uma vez que a velocidade de alimentação do arame foi programada e controlada pela fonte de soldagem. Com relação às incertezas da VA, os elevados valores para os ensaios em AD são consequência da variação da VA entre valores positivos (avanço) e negativos (reco) e, à medida que a frequência aumenta, as velocidades de pico são muito superiores à velocidade média, conforme mostrado na seção 4.8 e 5.2.

Tabela 22 – Valores médios de Corrente (I_{ARC}), Tensão do arco (U_{ARC}), Potência (P_{ARC}) e Velocidade do arame (VA_{med}) para a série de ensaios variando frequência de oscilação do arame.

Ensaio	I_{ARC} [A]	U_{ARC} [V]	P_{ARC} [W]	VA_{MED} [m/min]
AC Pt_Ct	180 ± 1	9,6 ± 0,2	1764 ± 45	1,51 ± 0,64
AC Pt_int	180 ± 1	10,8 ± 1,0	1931 ± 170	1,51 ± 0,41
AD 2 Hz	180 ± 2	10,6 ± 0,5	1913 ± 84	1,54 ± 2,59
AD 3 Hz	180 ± 2	10,3 ± 0,9	1845 ± 126	1,54 ± 2,67
AD 4 Hz	180 ± 1	10,4 ± 0,8	1878 ± 129	1,54 ± 6,13
AD 5 Hz	180 ± 2	10,3 ± 0,7	1850 ± 110	1,49 ± 5,74
AD 6 Hz	180 ± 2	10,4 ± 0,7	1829 ± 102	1,50 ± 7,75
AD 7 Hz	179 ± 1	10,4 ± 0,7	1875 ± 121	1,52 ± 9,31
AD 9 Hz	180 ± 2	10,4 ± 0,7	1873 ± 113	1,46 ± 10,61
AD 12 Hz	179 ± 2	10,5 ± 0,8	1878 ± 129	1,52 ± 18,32
AD 15 Hz	179 ± 1	10,4 ± 0,8	1860 ± 125	1,51 ± 33,38

Considerando a tensão do arco, a Figura 97 e a Tabela 23 mostram os três valores de tensão do arco, sendo eles a tensão média (verde), tensão em ponte metálica (azul) e tensão em ponte destacada (vermelho).

Figura 97 - Tensões do arco média (U_{ARC}), em ponte (U_{PT}) e destacada (U_{DEST}) para série se ensaios variando a frequência de oscilação do arame.



Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 23 - Tensões do arco para série se ensaios variando a frequência e oscilação do arame.

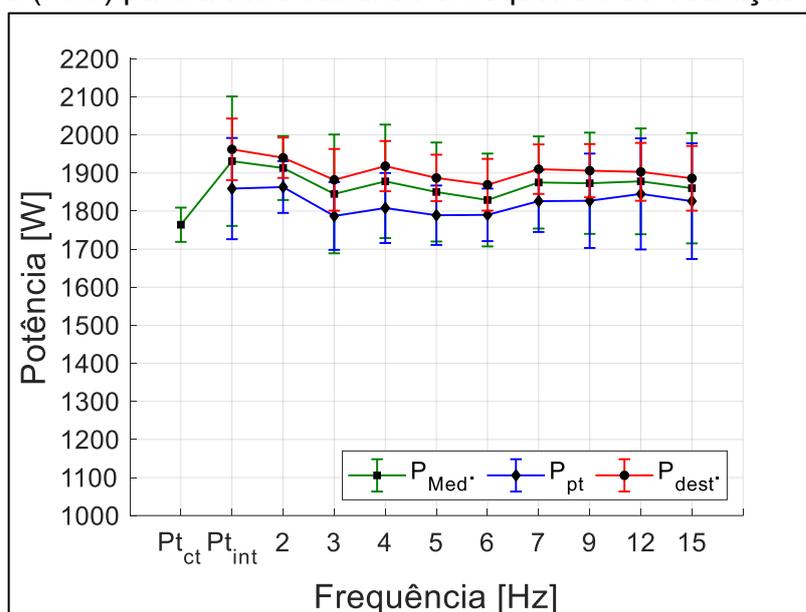
Ensaio	U_P [V]	U_{ARC} [V]	U_D [V]
AC Pt_Ct	-	9,6 ± 0,2	-
AC Pt_int	10,4 ± 0,7	10,8 ± 1,0	10,9 ± 0,4
AD 2 Hz	10,3 ± 0,4	10,6 ± 0,5	10,8 ± 0,3
AD 3 Hz	9,9 ± 0,5	10,3 ± 0,9	10,5 ± 0,4
AD 4 Hz	10,0 ± 0,6	10,4 ± 0,8	10,6 ± 0,3
AD 5 Hz	9,9 ± 0,4	10,3 ± 0,7	10,5 ± 0,3
AD 6 Hz	10,1 ± 0,4	10,4 ± 0,7	10,6 ± 0,3
AD 7 Hz	10,1 ± 0,4	10,4 ± 0,7	10,6 ± 0,3
AD 9 Hz	10,2 ± 0,7	10,4 ± 0,7	10,6 ± 0,4
AD 12 Hz	10,3 ± 0,8	10,5 ± 0,8	10,6 ± 0,4
AD 15 Hz	10,2 ± 0,8	10,4 ± 0,8	10,6 ± 0,4

Conforme mostram os dados, para o procedimento com alimentação convencional em ponte contínua, a tensão média do arco foi inferior, na ordem de 0,8 V, a todos os ensaios com alimentação dinâmica, e para alimentação convencional em ponte intermitente. Uma vez que na condição de ponte metálica o arco tende a encurtar, ancorando-se no arame, fenômeno também já observado em outros trabalhos [36, 72], a tensão média do arco apresenta um valor inferior que na condição de ponte destacada. Assim sendo, ainda na Figura 97, pode-se observar que o valor de tensão na condição em ponte também é inferior para os ensaios com alimentação

dinâmica, apresentando uma diferença, em média, de 0,3 V menor que a U_{ARC} e 0,6 V para a U_D .

O comportamento da tensão foi refletido na variação da potência do arco, sendo que a potência em ponte é inferior à média, e a potência destacada, superior. A Figura 98 e a Tabela 24 mostram os valores da potência aquisitados.

Figura 98 – Potência média (P_{ARC}), potência em ponte (P_{PT}) e potência em ponte destacada (P_{dest}) para a série variando a frequência de oscilação do arame.



Fonte: elaborado pelo autor.

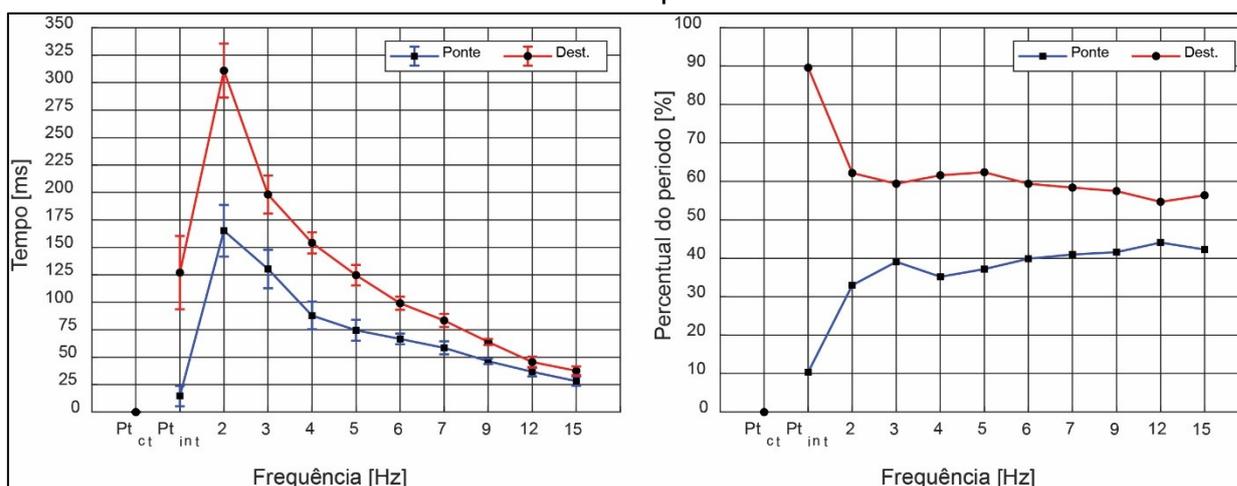
Tabela 24 - Potências para série se ensaios variando a frequência e oscilação do arame.

Ensaio	P_{PT} [W]	P_{ARC} [W]	P_{DEST} [W]
AC Pt_{Ct}	1764 ± 45	1764 ± 45	0 ± 0
AC Pt_{int}	1859 ± 133	1931 ± 170	1962 ± 81
AD 2 Hz	1863 ± 68	1913 ± 84	1940 ± 53
AD 3 Hz	1787 ± 89	1845 ± 126	1882 ± 81
AD 4 Hz	1808 ± 92	1878 ± 129	1918 ± 66
AD 5 Hz	1789 ± 78	1850 ± 110	1887 ± 61
AD 6 Hz	1790 ± 69	1829 ± 102	1869 ± 68
AD 7 Hz	1826 ± 81	1875 ± 121	1910 ± 65
AD 9 Hz	1827 ± 100	1873 ± 113	1906 ± 70
AD 12 Hz	1845 ± 104	1874 ± 45	1903 ± 76
AD 15 Hz	1826 ± 120	1866 ± 170	1896 ± 85

Nos ensaios com AC em ponte intermitente e para AD com 2 e 3 Hz, a tensão média do arco, assim como a potência, apresentou tendência em diminuir com o

aumento da frequência. Para as frequências maiores, a tensão manteve-se no patamar de 10,4 V. Este decremento pode ser explicado pelos períodos em ponte e ponte destacada para cada condição. A Figura 99 mostra a variação dos tempos nas condições em ponte e ponte destacada.

Figura 99 – Esq.) Tempos em ponte e ponte destacada. Dir.) Percentual do período para as condições em ponte e destacado. Valores referente à série de ensaios variando a frequência.



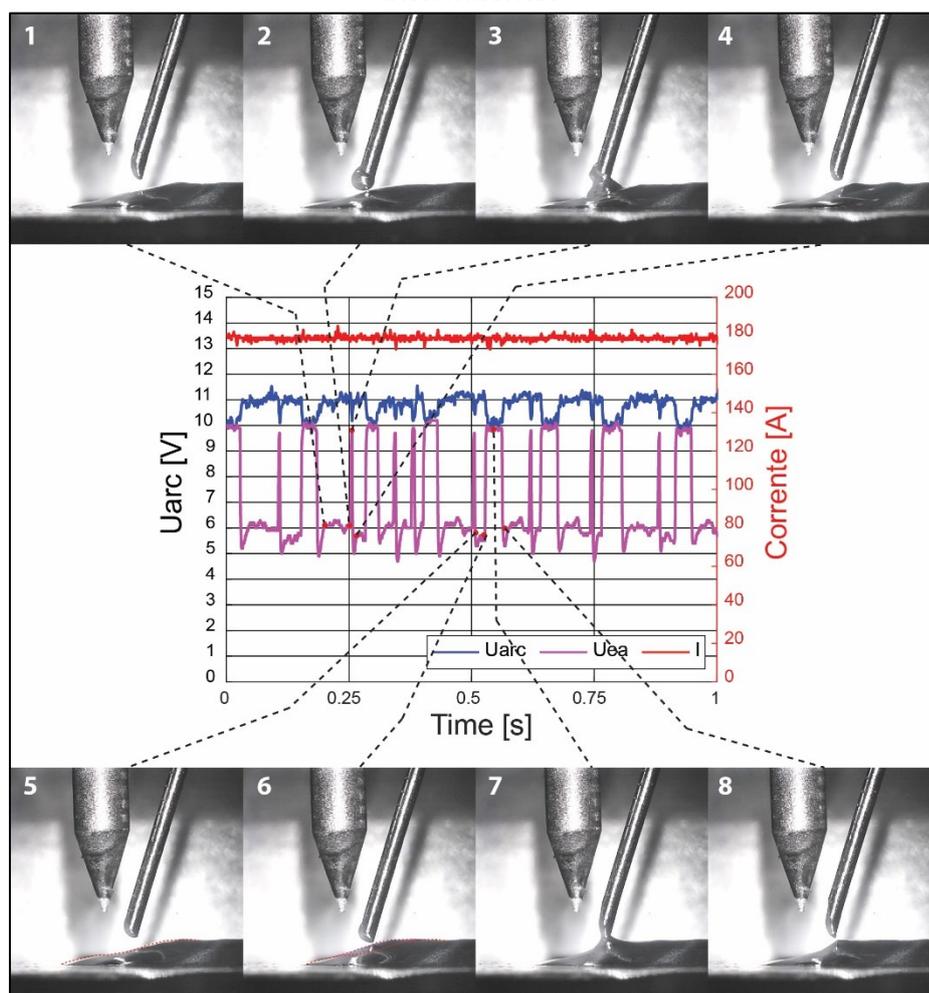
Fonte: elaborado pelo autor.

Conforme mostra o gráfico à esquerda, o período em ponte é menor que o período em ponte destacada para todos os ensaios. À medida que a frequência aumenta estes períodos naturalmente diminuem, entretanto, a diferença entre eles também. A Figura 99 à direita mostra o percentual do período para cada condição. Uma vez que a tensão do arco em ponte destacada é maior, quanto maior a proporção do período em que o arame estiver fora da poça metálica, maior será a tensão média do arco.

Para o caso de AC em ponte intermitente, a diferença dos tempos em ponte e destacado é bastante acentuada pois, uma vez que não há movimento de recuo, o arame encontra-se bastante próximo da poça de fusão, e a gota formada na ponta do arame é transferida, essencialmente, por tensão superficial. Entretanto, a condição de ponte intermitente não apresenta uniformidade nos períodos de transferência, conforme mostra a Figura 100. Nos quadros acima do gráfico, nota-se a formação de uma gota ligeiramente maior que nos frames inferiores. Isto porque o período em ponte destacada anterior à transferência foi maior (aprox. 88 ms entre frames 1 e 2), logo, houve mais tempo para formação da gota na ponta do arame. Nota-se também

o que tempo em ponte para transferência desta gota é bem menor, uma vez que o volume formado na ponta do arame é rapidamente destacado (aprox. 6,5 ms entre frames 3 e 4) por tensão superficial. No caso dos frames inferiores, o tempo em ponte destacada foi menor (aprox. 18 ms entre frames 5 e 6), assim como a gota formada na ponta do arame. Neste caso, o período em ponte metálica foi maior (aprox. 32,5 ms entre frames 5 e 8).

Figura 100 – Oscilograma e frames de filmagem para ensaios com AC em ponte intermitente.

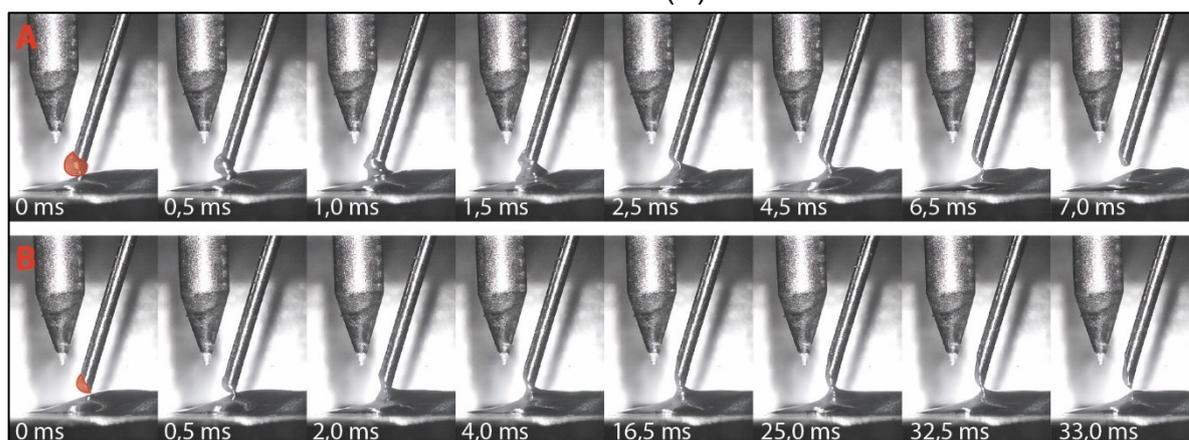


Fonte: elaborado pelo autor.

Os tempos de transferência da gota expostos no ensaio em ponte intermitente são bastante interessantes pois definem dois modos de transferência intermitente na condição de alimentação convencional. A Figura 101 mostra os dois modos de transferência descritos para o ensaio em com alimentação convencional em ponte intermitente. No caso A, o primeiro quadro apresenta uma condição em que a gota formada na ponta do arame apresenta geometria esférica bem definida com volume e

área de superfície maior que para o caso B. Considerando que o perímetro da linha de fusão entre a gota e o arame sólido é o mesmo e, que as tensões superficiais sejam iguais para ambos os casos, a força de tensão superficial que sustenta ambas as gotas é a mesma, dado que a força é o produto da tensão superficial com o perímetro de acoplamento. Entretanto, quanto maior a área de superfície da gota, maior será o perímetro de acoplamento da gota com a poça de fusão, logo, maior será a força de tensão superficial entre as partes líquidas (gota e poça de fusão). Assim sendo, quanto maior a gota na ponta do arame, mais rápida será a transferência da mesma à poça de fusão. Ademais, se a força entre a poça e a gota é igual, ou próxima, à força entre o arame e a gota, a ponte metálica encontra-se em equilíbrio (ponte contínua) ou tende a perdurar por mais tempo (caso B). Vale ressaltar que além do equilíbrio de forças, o arame está sempre avançando em direção a poça, contribuindo para a permanência da ponta metálica.

Figura 101 – Comparativo entre transferência em gota (A) e transferência em ponte intermitente (B).



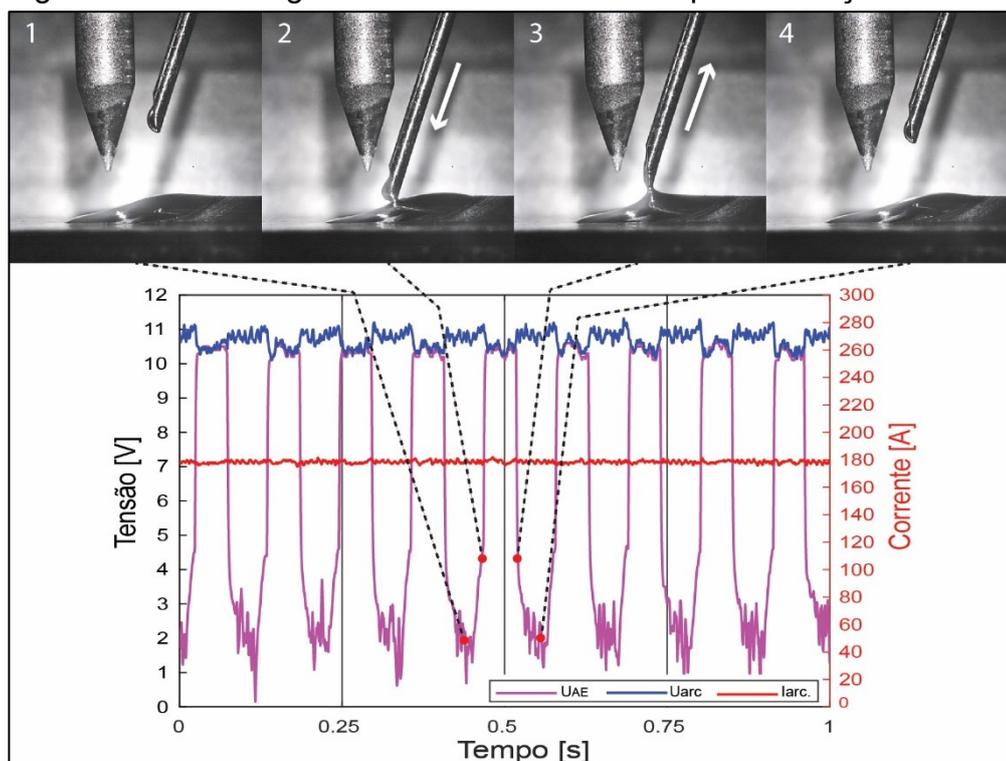
Fonte: elaborado pelo autor.

Embora em ambos os casos o processo de transferência seja essencialmente pela força de tensão superficial, o caso A representa um destacamento de gota bastante rápido (6,5 ms) e não há o estabelecimento de uma ponte metálica bem definida, pois, rapidamente, em 4,5 ms, o estrangulamento é máximo e em seguida ocorre a ruptura. Já para o caso B, não há a transferência de uma única gota e sim de um volume maior de material durante um período em que a ponte metálica se manteve em equilíbrio, até sua ruptura, o qual durou aproximadamente 32,5 ms. Assim sendo, define-se aqui dois modos de transferência metálica intermitente distintos, sendo o

caso A uma transferência em gotas, ou goticular, e no caso B uma transferência em ponte intermitente, ambos para alimentação convencional. Comparando estes resultados com os modos de transferências definidos por Taguchi et al. [67], o Caso A poderia ser considerado análogo ao modo de transferência TM3, onde $T_c \ll T_g$, e o caso B ao modo de transferência TM2 onde $T_c \approx T_g$.

Já para os casos com alimentação dinâmica, a diferença entre os tempos em ponte e destacado são bem menores, ainda que este seja sempre maior que aquele. Em média, o tempo em ponte foi 1,5x menor que o tempo destacado, sendo a maior diferença para a frequência de 2 Hz (1,9x). Entretanto, os períodos em ponte e ponte destacada para a condição de alimentação dinâmica são mais uniformes, corroborado pela menor incerteza das amostras. A Figura 102 mostra o gráfico de tensão do arco e tensão arame-eletrodo para a condição de AD em 9 Hz. Para este caso, os períodos em ponte apresentaram, em média, $46,3 \pm 2,4$ ms, enquanto o período em ponte destacada foi $63,9 \pm 2,7$ ms.

Figura 102 – Oscilograma de tensão e corrente para condição AD 9 Hz.

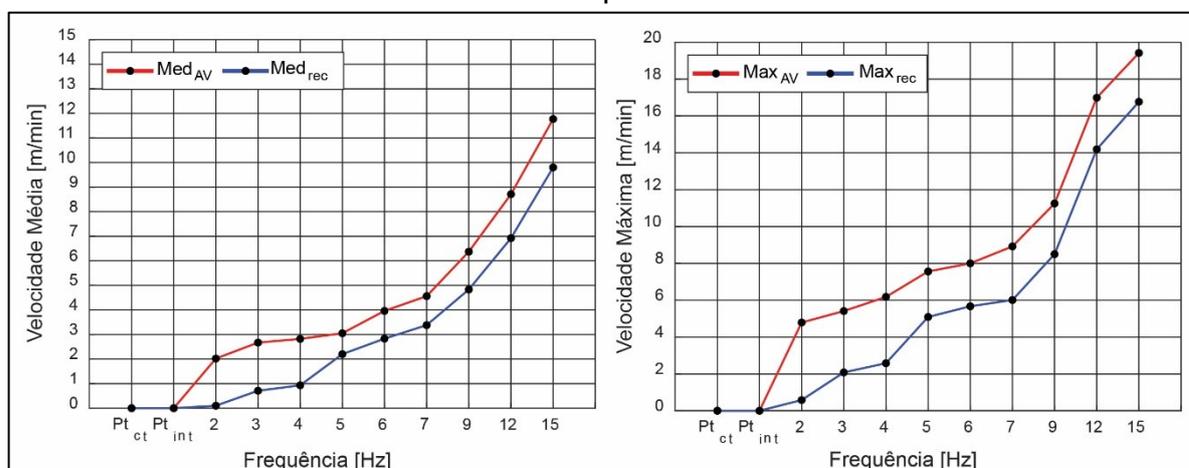


Fonte: elaborado pelo autor.

Ainda que o tempo em ponte destacada para o ensaio apresentado na Figura 102 (63,9 ms) seja maior do que o caso de ponte intermitente (18 ms), a gota formada

na ponta do arame é minimizada. Isto porque, com a alimentação dinâmica, o arame afasta-se da poça, e do arco, reduzindo a taxa de fusão durante o período de ponte destacada. Ademais, as velocidades de recuo e avanço são bem mais elevadas, fazendo com que o arame se aproxime da poça, atravessando a coluna do arco, com uma velocidade média mais alta. Neste caso (AD 9 Hz), a VA_{AV} foi de 6,37 m/min, atingindo uma VA_{MAX_AV} de 11,25 m/min. Este fenômeno também fora observado por Silva et al. [36], onde os autores mostraram que a elevada velocidade instantânea do arame reduz o volume da gota formado na ponta do arame. A Figura 103 mostra os gráficos de velocidades médias e máximas para avanço e recuo da série variando a frequência de oscilação do arame.

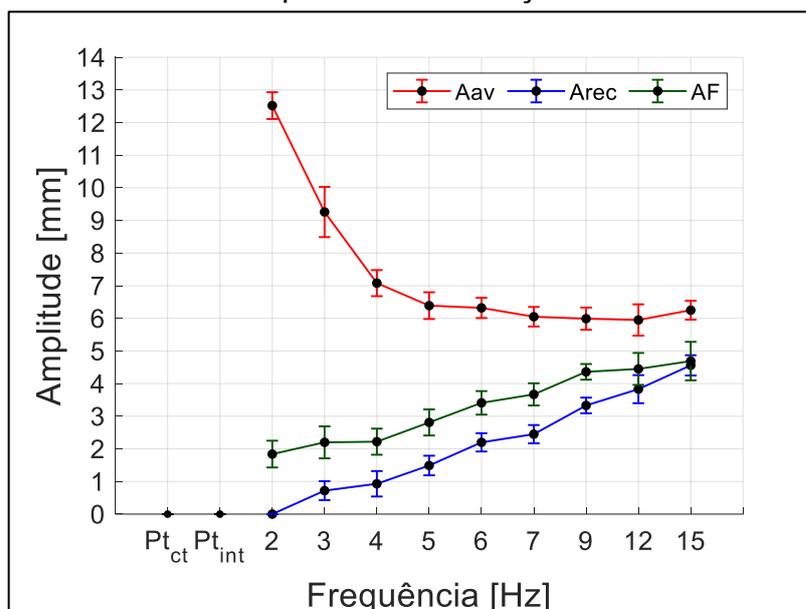
Figura 103 – Velocidades médias e máximas de avanço e recuo para a série variando a frequência - MAD.



Fonte: elaborado pelo autor.

Naturalmente, conforme demonstrado na seção 5.2, a velocidade média e máxima de avanço e recuo variam em função da frequência, entretanto, não apenas a velocidade de avanço elevada contribui com redução do volume da gota na ponta do arame. A amplitude de recuo, bem como o afastamento máximo também influenciam no volume fundido na ponta do arame. Figura 104 mostra os gráficos da variação das amplitudes de avanço e recuo, bem como o afastamento máximo com a variação da frequência de oscilação do arame.

Figura 104 – Amplitude de avanço, recuo e afastamento máximo para a série variando frequência de oscilação do arame.

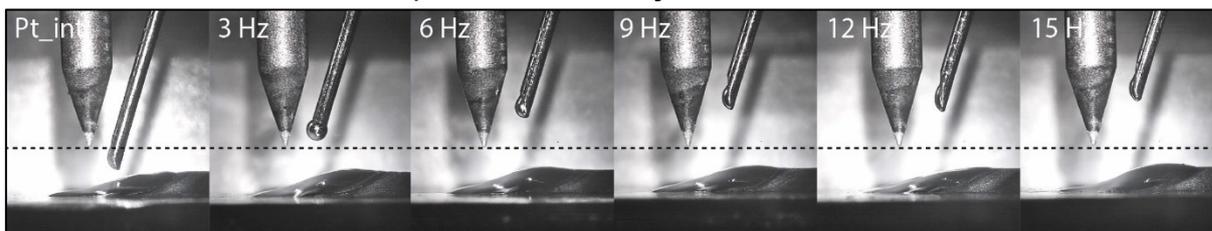


Fonte: elaborado pelo autor.

Vale ressaltar que a amplitude de oscilação regulada (5 mm) foi a mesma para todas as frequências (com exceção dos casos de AC). Entretanto, quanto menor a frequência, maiores são os períodos de avanço e recuo do arame e, conforme já mostrado, menores são a VA_{Av} e VA_{Rec} . Associando as velocidades de avanço e recuo com a velocidade de alimentação do arame (regulada na fonte), quanto menor a frequência, maior a amplitude de avanço (A_{Av}) e menor a amplitude de recuo (A_{Rec}). Para a frequência de 2 Hz, o arame praticamente não recuou, entretanto, a A_{Av} foi alta, próximo à 12,5 mm, correspondendo à 2,5x a amplitude de oscilação regulada. À medida que a frequência aumenta, os períodos de avanço e recuo diminuem, e VA_{Av} e VA_{Rec} aumentam, logo as A_{Av} e A_{Rec} tendem a convergir para o valor de amplitude de oscilação regulada.

A Figura 105 mostra os quadros onde o arame encontra-se na posição de recuo máximo. A linha tracejada representa a ponta do eletrodo, como referência. Nota-se que o volume da gota na ponta do arame é menor para maiores frequências, as quais, por sua vez, apresentam um recuo maior.

Figura 105 – Posição de máximo recuo do arame para série de ensaios variando a frequência de oscilação do arame.

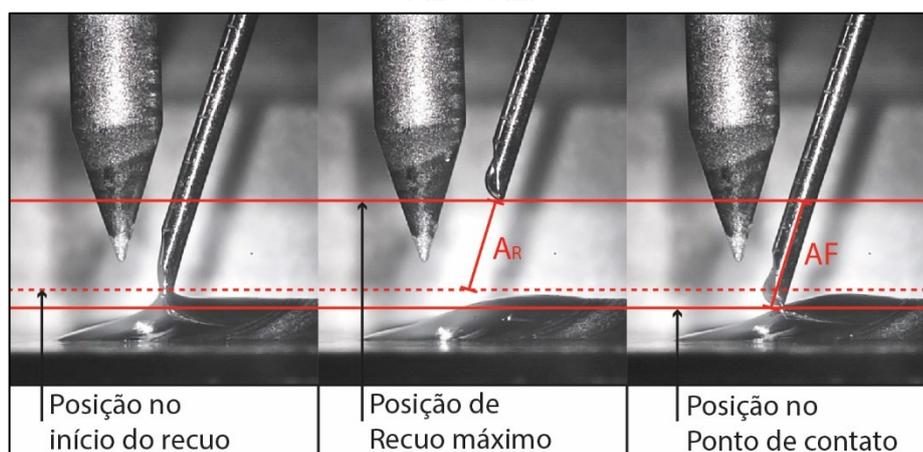


Fonte: elaborado pelo autor.

A Figura 104 mostra também a variação do afastamento máximo (verde) com a frequência. Note que este parâmetro é maior, para todos os casos, que a amplitude de recuo. A diferença entre a amplitude de recuo e o afastamento máximo é dada pela posição que a ponta do arame se encontra no início do recuo, e a posição que o arame estabelece a ponte metálica com a poça de fusão. A Figura 106 mostra visualmente o que cada parâmetro representa. Pelas imagens, nota-se que esta diferença é dada pelo alongamento da poça provocado pela tensão superficial, a qual, por sua vez, acaba “puxando” a poça para cima. Após a ruptura da ponte metálica, a poça assume a geometria “natural” aumentando a distância do próximo ponto de contato com o arame.

Para o caso de AD em 9 Hz, a amplitude de recuo foi de 3,43 mm, enquanto o afastamento máximo foi de 4,26 mm, isto é, 0,83 mm maior. Esta diferença é representada pelo espaçamento em a linha vermelha inferior e a tracejada.

Figura 106 – Amplitude de recuo (A_R) e afastamento máximo (A_F) para o ensaio com AD 9 Hz.

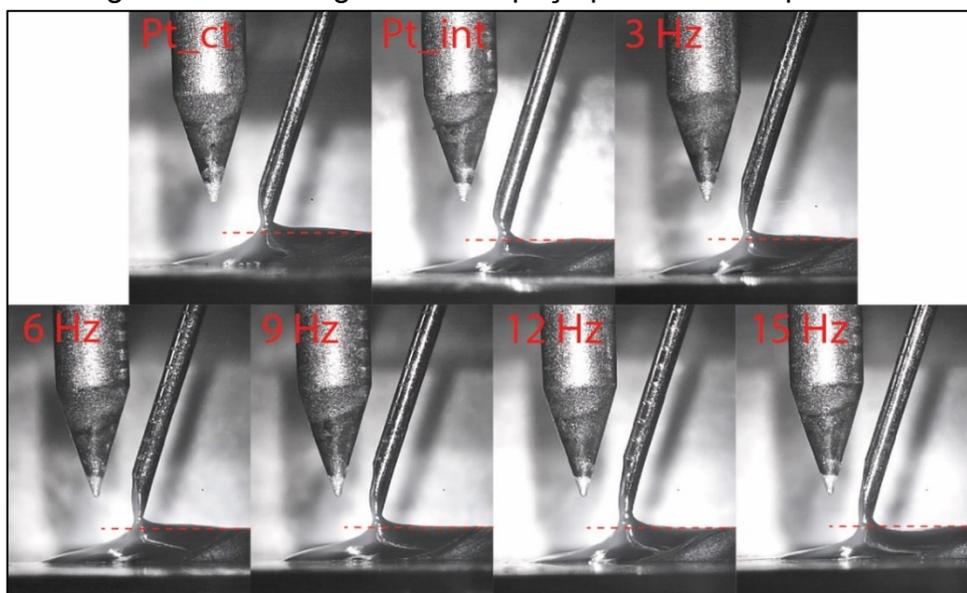


Fonte: elaborado pelo autor.

Em frequências mais baixas, além da diferença representada na figura acima, existem também um acréscimo no afastamento máximo devido à maior fusão da ponta do arame, formando a gota de maior volume, proporcionado pela menor velocidade instantânea do arame.

Além disso, o alongamento da poça não pode ser simplesmente calculado pela diferença entre A_R e A_F . Isto porque o alongamento foi presente em todas as condições ensaiadas, até mesmo para a condição de AC em ponte constante, uma vez que a transferência metálica se dá pela tensão superficial. A Figura 107 mostra os frames onde ocorre o início do recuo do arame, com exceção para as duas condições de alimentação convencional (Pt_{ct} e Pt_{int}), onde não houve recuo. Nota-se que em todas elas o cone formado pela poça fundida está acima da linha da superfície do cordão já solidificado (destacados pelas linhas tracejadas), e não há uma diferença significativa no quanto a ponta do cone está acima desta linha. Porém é notável um aumento no diâmetro da região superior do cone, em contato com o arame, principalmente para os casos inferiores (6, 9, 12 e 15 Hz). No caso de 15 Hz é possível notar certa concavidade na superfície da gota devido ao puxamento por tensão superficial.

Figura 107 – Alongamento da poça por tensão superficial.



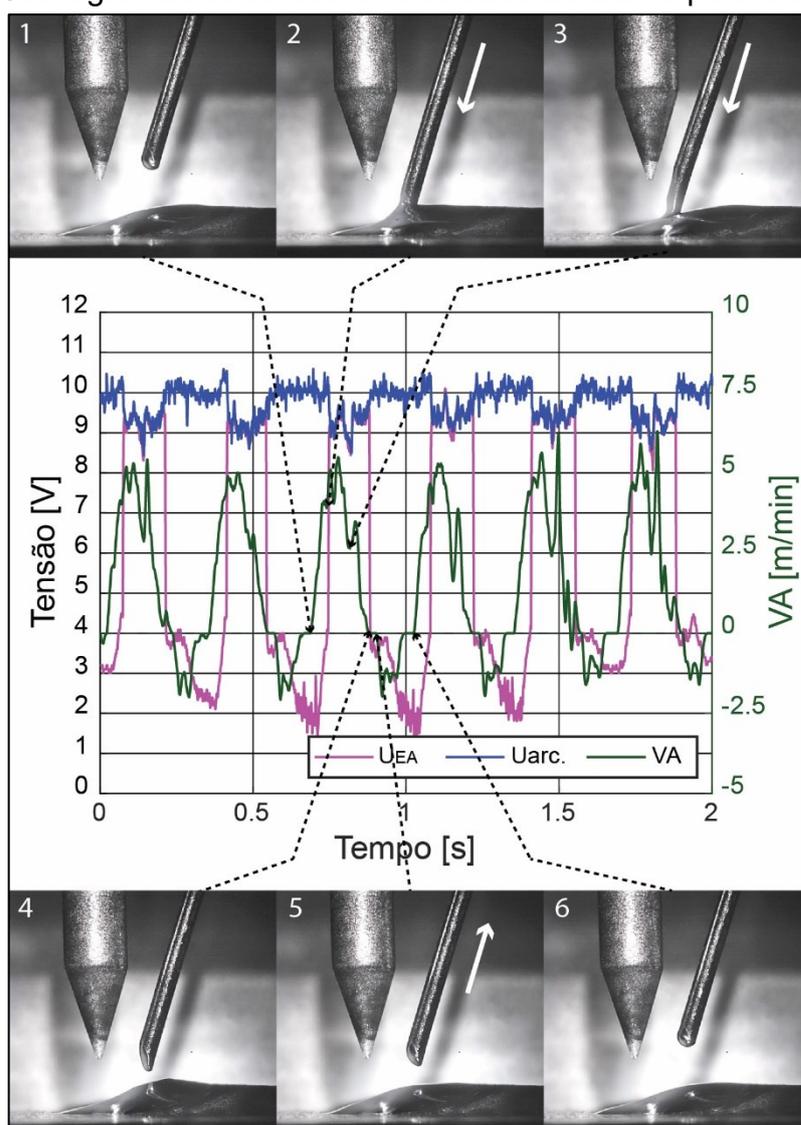
Fonte: elaborado pelo autor.

À medida que a frequência aumenta, os eventos que envolvem a transferência metálica, por sua vez, passam a ocorrer mais rapidamente. As velocidades médias e

máximas aumentam, os períodos diminuem, as rampas de aceleração e desaceleração são mais inclinadas e o intervalo de inversão de movimento são menores. Neste sentido, a fusão do arame durante inversão do movimento acaba sendo reduzida, e o início do movimento de recuo se dá antes que a ponta do arame seja fundida e “escorra” para a poça metálica, o que também explica o maior diâmetro do cone acoplado ao arame para frequências mais elevadas.

Outro fenômeno importante de destacar é o momento de ruptura da ponte metálica. Em frequências mais baixas, além das velocidades de avanço e recuo, menores são a aceleração e desaceleração do arame. Dependendo da condição, a taxa de fusão acaba prevalecendo sobre a taxa de alimentação, e a ruptura da ponte metálica é antecipada. A Figura 108 mostra os oscilogramas de tensão e VA para o ensaio AD em 3 Hz associados com os quadros obtidos pela filmagem em alta velocidade. O Quadro 1 mostra o ponto de maior recuo do arame, onde a velocidade é nula. O Quadro 2 representa o momento em que a ponte metálica é estabelecida (degrau no sinal de U_{AE}). Já no terceiro quadro, nota-se uma quebra abrupta do valor de VA, caracterizado pela ocorrência do *stutting*, conforme descrito na seção 5.2. Já no Quadro 4, a ruptura da ponte metálica se deu praticamente no mesmo instante em que o arame parou (velocidade nula), e o início do recuo se deu com a ponte metálica já rompida (Quadro 5).

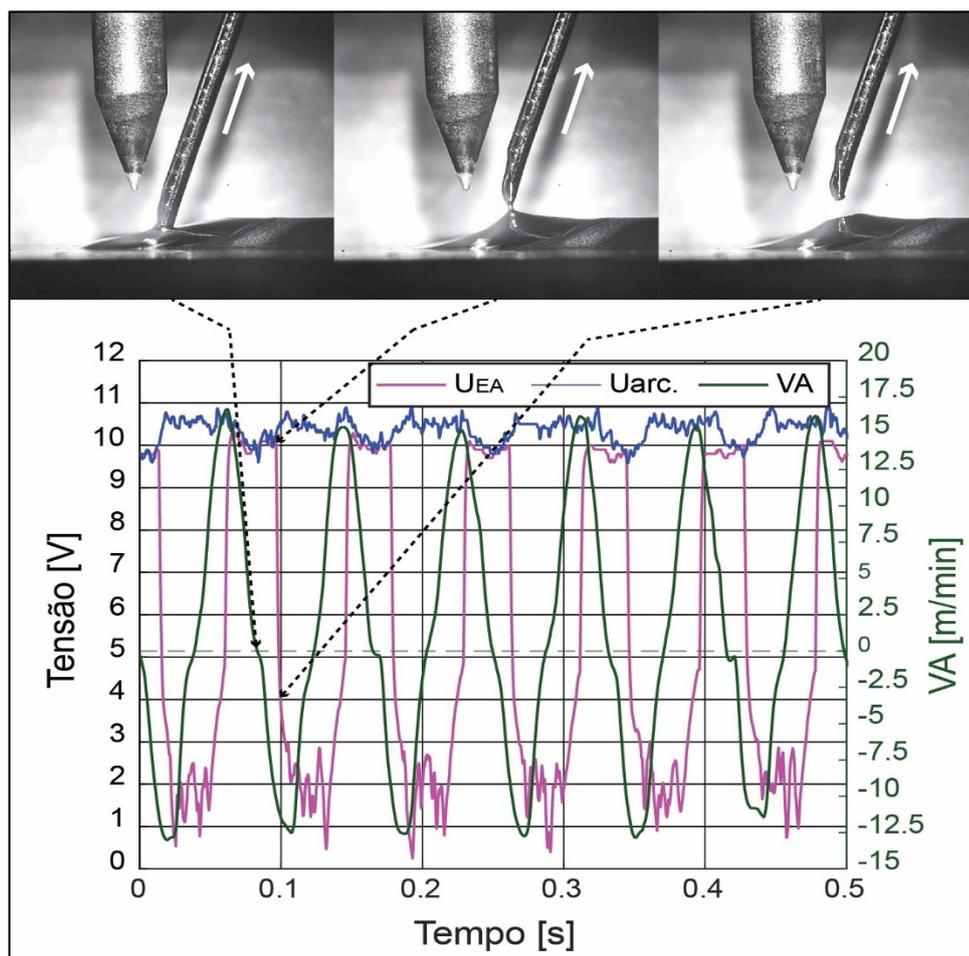
Figura 108 – Oscilogramas de tensão e velocidade do arame para o ensaio AD 3Hz.



Fonte: elaborado pelo autor.

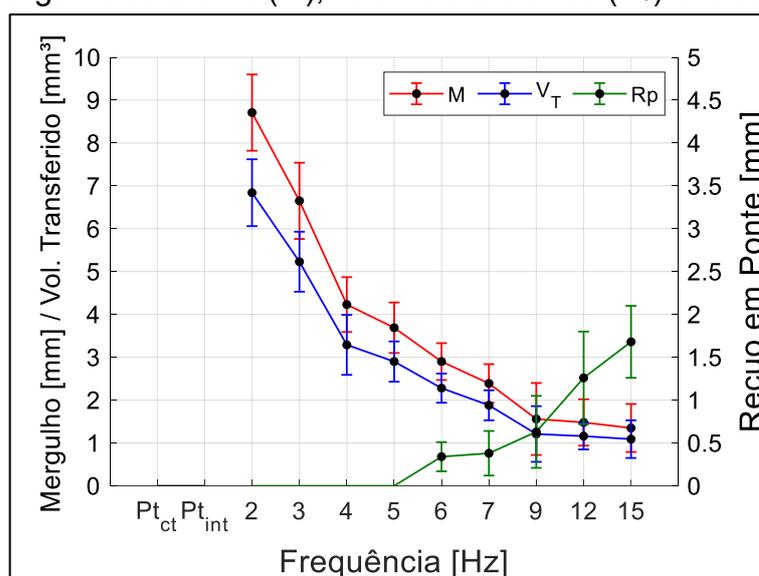
Diferentemente, em frequências mais elevadas, a ruptura da ponte ocorre durante o movimento de recuo. A Figura 109 mostra os oscilogramas de tensão e VA para o ensaio AD com 12 Hz. Como pode ser visto, o início do movimento de recuo ocorre praticamente na metade do período em ponte, e a ruptura ocorre quando a o arame atinge a máxima velocidade de recuo.

Figura 109 – Oscilogramas de tensão e velocidade do arame para o ensaio AD 12 Hz.



Fonte: elaborado pelo autor.

A linha em verde mostrada no gráfico da Figura 110 indica o valor do recuo em ponte (R_P) para a série de ensaios variando a frequência de oscilação do arame. Além do ensaio AD em 3 Hz, mostrado anteriormente, os ensaios AD em frequências de 2, 4 e 5 Hz também apresentaram a ruptura da ponte metálica antes do início do recuo do arame. Dado estas condições, define-se aqui a frequência mínima necessária para que haja o recuo em ponte. No presente caso, esta frequência foi de 6 Hz. Abaixo disso, embora ainda haja recuo do arame (vide Figura 104), não há o recuo em ponte, pois esta se rompe ainda no avanço ou durante a inversão do movimento. Vale ressaltar que, assim como a frequência mínima para que haja alimentação dinâmica (seção 5.2), a frequência mínima de recuo em ponte também é definida em função dos demais parâmetros utilizados.

Figura 110 – Mergulho do arame (M), volume transferido (V_T) e recuo em ponte (R_P)

Fonte: elaborado pelo autor.

A Figura 110 mostra também a variação do mergulho do arame (vermelho) com aumento da frequência. Embora os valores de M sejam bastante acentuados para as frequências mais baixas, isso não implica que o recuo ocorrerá também em ponte metálica, pois a baixa velocidade de avanço e recuo, propiciam o rompimento da ponte metálica precocemente, conforme já comentado nesta seção. Nesse caso, o comprimento de arame mergulhado é dado principalmente pelo período de avanço, o qual é maior para frequências menores. Embora para o caso de AD 3Hz, a velocidade média de avanço tenha sido relativamente baixa (2,7 m/min), esta já estaria acima do limite superior da velocidade de alimentação para alimentação convencional (Tabela 6). Associada ao maior período de avanço, onde a amplitude de avanço também foi acentuada (9,26 mm), resultou-se num maior comprimento de arame mergulhado. Para o caso de 12 Hz, por exemplo, mesmo que a velocidade média de avanço tenha sido maior (8,7 m/min), o período de avanço, bem como a amplitude de avanço são bem menores, resultando numa diminuição do mergulho.

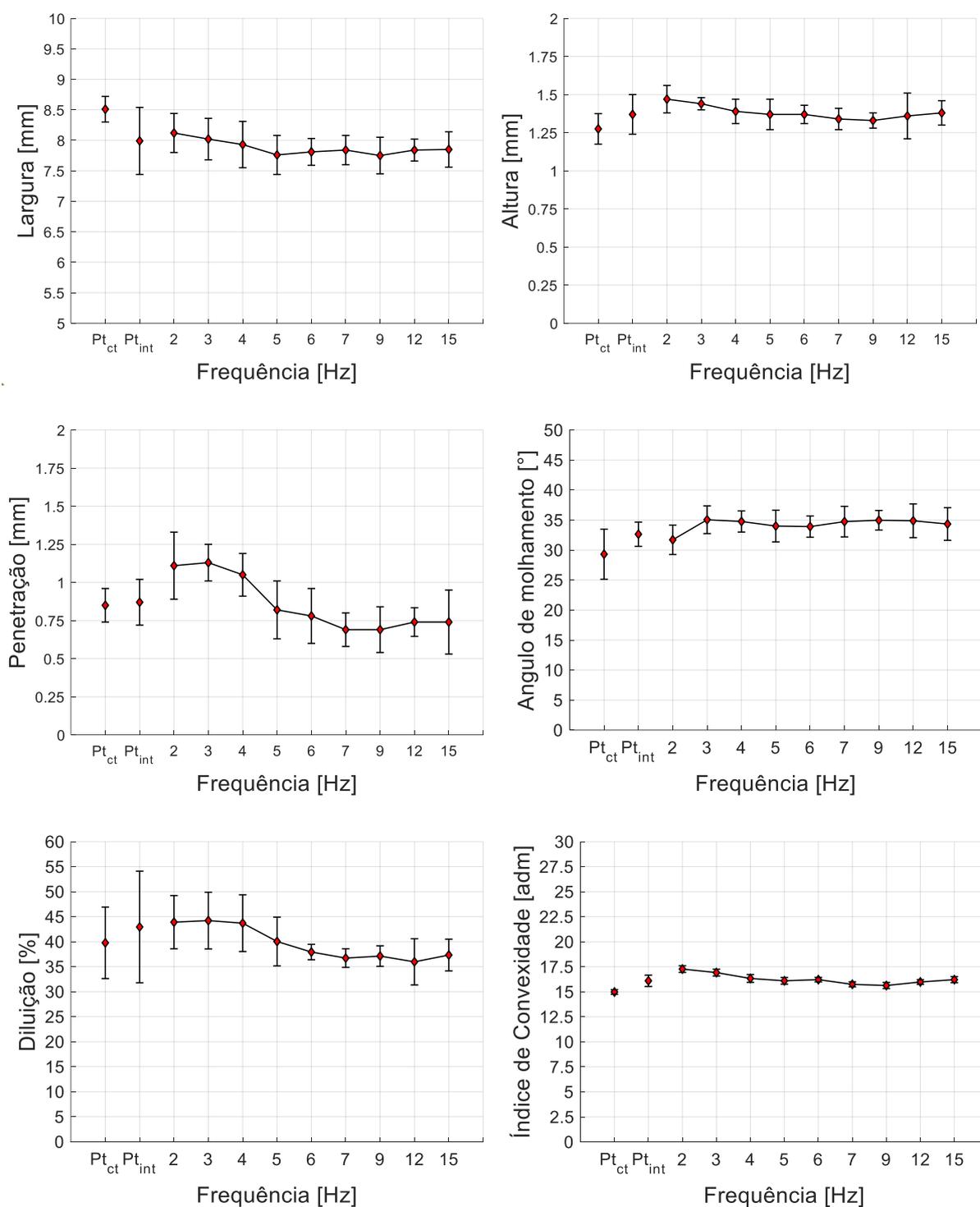
Se analisarmos os gráficos da VA mostrados na Figura 108 e na Figura 109, nota-se que a ocorrência de *sticking* para a frequência de 3 Hz é alta, caracterizado pela frequente oscilação do sinal de VA, enquanto para 12 Hz a VA é bastante uniforme e livre de *sticking*. Este comportamento pode ser dado como uma consequência da quantidade de material que está sendo transferida a cada ciclo, o qual no caso de frequências menores, é maior. Assim sendo, durante o avanço, a taxa

de alimentação prevalece sobre a taxa de fusão. À medida que o mergulho diminui, o volume de material transferido por ciclo também é menor, e, considerando que boa parte do calor para fusão do arame provém da poça fundida, a capacidade de fusão do processo é maior, o que contribui para a prevenção do *stubbying*.

Os eventos relacionados à transferência metálica descritos, por sua vez, acabaram por influenciar na geometria dos cordões de solda. A Figura 111 e a Tabela 25 mostram os gráficos e valores geométricos dos cordões, enquanto a Figura 112 mostra o corte transversal dos cordões de solda. Nos gráficos, os ensaios em AC estão destacados dos ensaios em AD, visto que para esta condição não há variação de frequência de oscilação e o modo de transferência é outro. Ademais, para a AD é possível verificar tendências nos valores à medida que a frequência varia. Desse modo, os ensaios em alimentação constante não serão levados em consideração para as análises estatística. Entretanto, valores absolutos serão considerados como critério comparativo.

Conforme pode ser visto nos gráficos seguintes, as dimensões de largura, reforço, ângulo de molhamento, apresentaram valores bem diferentes dos demais ensaios da série. Os cordões realizados em ponte contínua apresentaram uma maior largura do cordão comparado com os ensaios em alimentação dinâmica, com valor médio de $8,51 \pm 0,21$ mm, enquanto a altura do reforço foi menor. Para esta dimensão, o valor médio foi de $1,27 \pm 0,21$ mm. Estes dois resultados levaram a um menor ângulo de molhamento, com valor médio de $29,3 \pm 4,1^\circ$. Embora para este ensaio a tensão média do arco, bem como a potência, tenham sido mais baixas, ainda assim o cordão apresentou melhor espalhamento. Diferentemente para o ensaio AC em ponte intermitente, a largura do cordão foi menor e altura maior, mesmo que a potência do arco tenha sido a maior entre todos os ensaios, o que sugeriria um cordão com melhor espalhamento.

Figura 111 – Gráficos da variação geométrica dos cordões para a série variando frequência de oscilação.

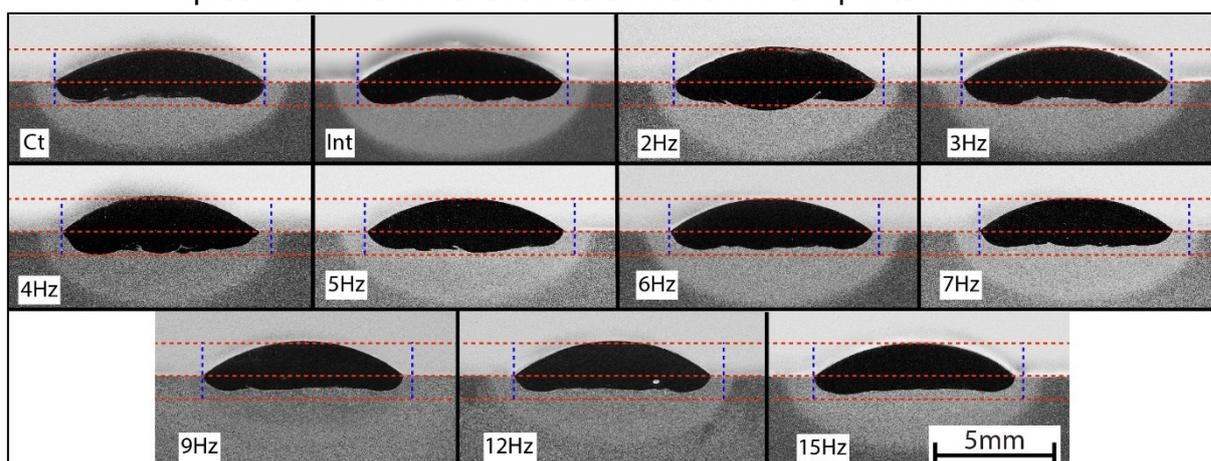


Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 25 – Valores geométricos dos cordões de solda para a série variando frequência de oscilação.

Ensaio	L [mm]	R [mm]	P [mm]	Am [°]	D [%]
AC P_ct	8,51 ± 0,21	1,27 ± 0,1 1	0,85 ± 0,01	29,3 ± 4,1	39,77 ± 7,15
AC P_int	7,89 ± 0,65	1,37 ± 0,12	0,87 ± 0,15	32,6 ± 0,2	42,94 ± 11,16
AD 2 Hz	8,12 ± 0,42	1,47 ± 0,10	1,11 ± 0,22	31,7 ± 2,4	43,90 ± 5,32
AD 3 Hz	8,02 ± 0,34	1,44 ± 0,04	1,13 ± 0,12	35,4 ± 4,3	44,22 ± 5,67
AD 4 Hz	7,93 ± 0,38	1,39 ± 0,08	1,05 ± 0,14	32,7 ± 0,8	43,70 ± 5,67
AD 5 Hz	7,71 ± 0,32	1,37 ± 0,12	0,82 ± 0,19	34,0 ± 2,6	40,04 ± 4,87
AD 6 Hz	7,91 ± 0,22	1,37 ± 0,06	0,80 ± 0,18	33,9 ± 2,8	37,93 ± 1,14
AD 7 Hz	7,94 ± 0,24	1,34 ± 0,07	0,69 ± 0,11	34,7 ± 1,6	36,72 ± 1,86
AD 9 Hz	7,75 ± 0,30	1,33 ± 0,05	0,69 ± 0,15	34,9 ± 1,6	37,12 ± 2,05
AD 12 Hz	7,84 ± 0,18	1,36 ± 0,15	0,74 ± 0,10	34,8 ± 2,8	35,97 ± 2,62
AD 15 Hz	7,85 ± 0,29	1,38 ± 0,08	0,74 ± 0,21	34,3 ± 2,7	37,33 ± 3,17

Figura 112 – Macrografias dos cordões da série de ensaios variando frequência. Amostras do centro do cordão (corte BB da Figura 46). Linhas tracejadas representam as dimensões da amostra AC em ponte contínua.



Fonte: elaborado pelo autor.

Já para os ensaios com alimentação dinâmica, nota-se que a variação da frequência de oscilação acaba influenciando na geometria do cordão. Para as dimensões de largura e reforço do cordão, nota-se uma tendência em diminuir com o aumento da frequência. Embora uma menor largura e maior reforço fossem esperados, com relação aos ensaios em alimentação convencional, a tendência em diminuir, ambas as dimensões, com o aumento da frequência é contraintuitivo.

Entretanto os resultados são bastante interessantes e em alguns casos mostram que há um ponto de inflexão próximo a frequência de 9 Hz em ambas as curvas.

Com relação à penetração e diluição nota-se que as frequências menores, promoveram uma maior penetração. Este resultado pode estar relacionado com o mergulho do arame e ocorrência de stubbing, os quais foram maiores e mais presentes para as frequências menores, e que podem provocar uma “penetração forçada”, levando mais material para o fundo da poça, além de espalhar lateralmente (maior largura do cordão). Ademais, a frequência mínima para recuo em ponte foi de 6 Hz, logo, as frequências que apresentaram maior diluição estão abaixo, o que pode também estar relacionado com a maior penetração. Para frequências acima de 6 Hz, a penetração e diluição também foram menores quando comparadas aos ensaios com alimentação convencional.

Para avaliar estatisticamente os resultados geométricos em função da frequência de oscilação do arame, aplicou-se o método estatístico de análise de variância (ANOVA), descrito na seção 4.4. Os resultados mostram que a hipótese nula (H_0) pode ser rejeitada para as dimensões de reforço, penetração e diluição do cordão, visto que o valores p obtidos foram inferiores à 0,05. Isto indica que há uma diferença significativa em pelo menos uma das médias. Já para a largura do cordão e ângulo de molhamento, a hipótese nula não pode ser rejeitada, e não se pode concluir que houve uma variação significativa entre os valores medidos. A Tabela 26 mostra os valores de p obtidos na análise de variância aplicada. Vale ressaltar que o conjunto de dados analisado desconsiderou os ensaios com alimentação convencional.

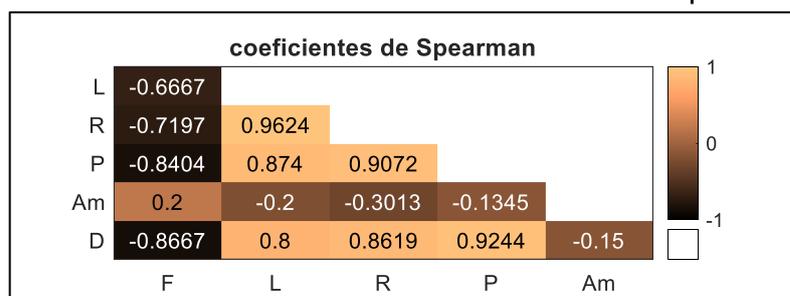
Tabela 26 – Valores de p -value referentes ao método ANOVA aplicado sobre os resultados geométricos da série variando frequência.

	Largura	Reforço	Penetração	Ângulo de Molh.	Diluição
p-value	0,6248	0,01858	$4,29 \times 10^{-5}$	0,4224	$7,52 \times 10^{-5}$

Para complementar a análise estatísticas dos resultados, além da análise de variância, a qual indica se houve uma variação significativas entre os valores medidos, aplicou-se também o método de correlação de Spearman (descrito na seção 4.4). Esta análise foi levada em consideração a fim de correlacionar a variação da frequência com os valores geométrico. O mapa de calor mostrado na Figura 113 indica os valores dos coeficientes calculados da análise de correlação aplicada.

Nota-se que para as dimensões de reforço, penetração e diluição, os coeficientes indicam que há uma forte correlação negativa com a frequência (valores acima de -0,7)., isto é, o aumento da frequência provoca uma diminuição destas geometrias. Já para a Largura, o valor de -0,6667 indica que a correlação é moderada, também negativa, enquanto para o ângulo de molhamento, a análise indicou uma correlação fraca, entretanto, positiva.

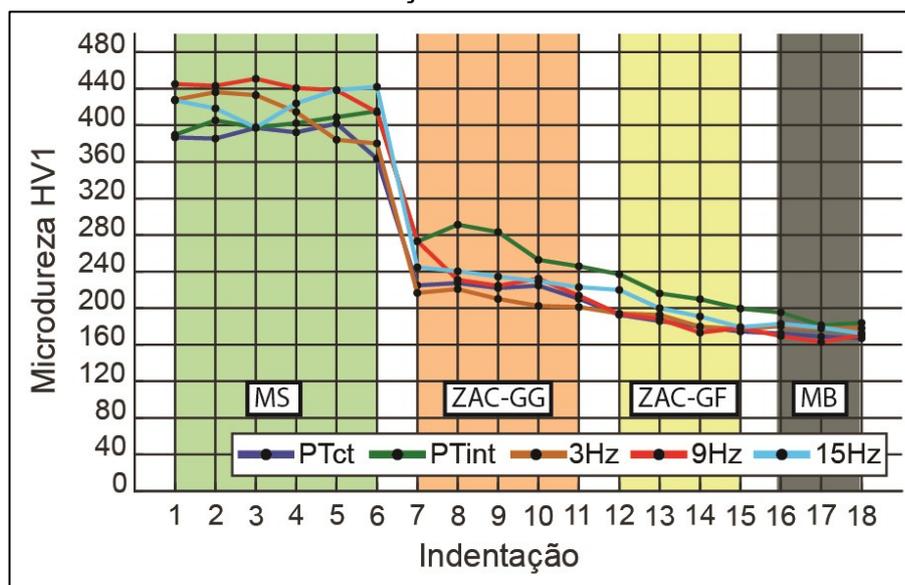
Figura 113 – Coeficientes de correlação de Spearman da frequência com valores geométricos dos cordões da série de ensaios variando a frequência de oscilação.



Fonte: elaborado pelo autor.

Para esta série de ensaios também foi medida a microdureza para os ensaios com AC em ponte contínua e ponte intermitente, e para a condição AD nas frequências de 3, 9 e 15 Hz. A Figura 114 mostra o gráfico das medições de dureza para cada corpo de prova, destacadas por região, sendo elas: metal de solda (MS); zona afetada pelo calor de grãos grosseiros (ZAC-GG); zona afetada pelo calor de grãos finos (ZAC-GF) e metal de base (MB). Já a Tabela 27 mostra os valores médios de cada região.

Figura 114 – Microdureza Vickers HV1 para ensaios variando frequência de oscilação do arame.



Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 27 – Microdureza para ensaios variando a frequência de oscila o do arame.

DUREZA HV1	MS	ZAC-GG	ZAC-GF	MB
AC P_ct	387,8	221,8	183,2	169,4
AC P_int	403,2	269,2	215,6	186,9
AD 3Hz	413,1	210,1	185,9	178,7
AD 9 Hz	438,8	234,9	183,3	167,6
AD 15 Hz	424,7	234,4	197,5	178,0

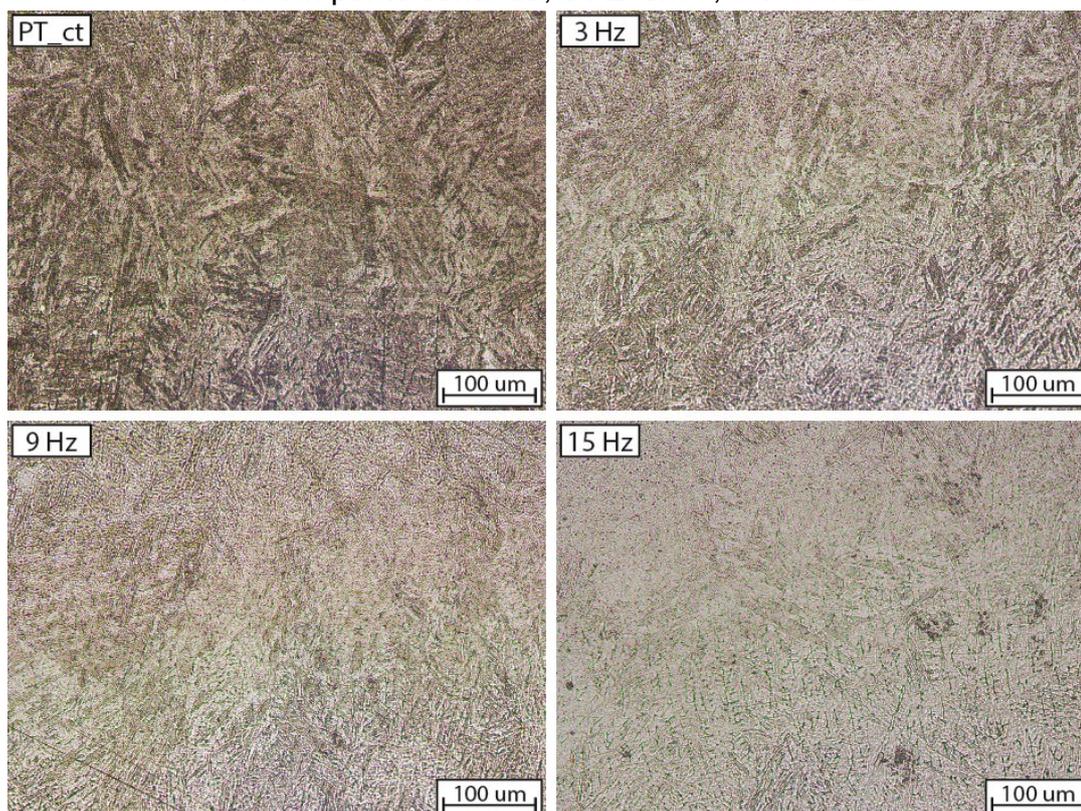
Conforme pode ser observado, nas condi es de alimenta o convencional, houve um aumento na dureza média para a transferência em ponte intermitente. Pela análise de variância, cujos valores p são mostrados na Tabela 28, pode-se afirmar que houve uma diferença significativa nos valores de dureza média obtidos para estas duas condi es. Comparando a condi o AC em ponte contínuo com os ensaios em AD, nota-se que os valores médios aumentaram com a varia o da frequência. Os valores- p obtido para cada frequência comparada   alimenta o convencional em ponte contínuo mostraram que há uma diferença significativa entre as médias, visto que todos eles foram inferiores   0,05. Entretanto, comparando apenas os ensaios com alimenta o dinâmica, a hipótese nula não pode ser rejeitada e não   possível afirmar que houve uma diferença entre as médias, visto que o valor- p foi superior   0,05.

Tabela 28 – Valores p da análise de variância (ANOVA) para os resultados de microdureza.

	Pct - Pint	Pct-3Hz	Pct-9Hz	Pct-15Hz	3-9-15Hz
<i>p-value</i>	0,0423	0,04826	0,0001	0,0015	0,0815

Os resultados de microdureza obtidos podem ser correlacionados com a microestrutura resultante dos cordões. A Figura 115 mostra a microestrutura do metal de solda para as condições AC em ponte contínua e AD em 3, 9 e 15 Hz. Assim como os resultados apresentados por Riffel [9] e Dorneles [11], a alimentação dinâmica induziu a um refino da microestrutura, o que, por sua vez, aumentou os valores de dureza no metal de solda. Conforme pode ser visto, a condição AC Pt_ct apresentou uma estrutura muito mais grosseira que as demais condições, sobretudo para as frequências de 9 e 15 Hz, as quais apresentaram uma estrutura mais homogênea e refinada que para 3 Hz.

Figura 115 – Microestrutura do metal de solda na região central para os ensaios em AC em ponte contínua, e AD em 3, 9 e 15 Hz.



Fonte: elaborado pelo autor.

O refinamento de grãos pode ser atribuído, entre outros fatores, a uma maior taxa de resfriamento da poça [17, 81, 82]. Uma hipótese destacada na literatura [7, 9, 60] sugere que, com a alimentação dinâmica, o arame atinge a poça de fusão com uma temperatura mais baixa, absorvendo mais calor do metal líquido e aumentando a taxa de resfriamento. No presente caso, esse mecanismo também pode ter contribuído para o refinamento dos grãos. Entretanto, conforme será discutido na seção 5.3.5, os resultados obtidos por termografia infravermelha apontam para outra explicação do aumento da taxa de resfriamento.

Segundo a literatura, taxas mais elevadas aumentam o grau de super-resfriamento constitucional, favorecendo a formação de grãos refinados [17, 81, 82]. Além disso, a agitação mecânica da poça, causada pela oscilação do arame, reduz a temperatura do líquido e favorece a nucleação heterogênea, técnica amplamente utilizada para o refinamento de grãos [17, 81, 82]. Outro mecanismo possível é a fragmentação de dendritas e grãos parcialmente fundidos das regiões adjacentes, que atuam como agentes núcleadores para novos grãos no metal de solda [81, 82].

Embora o refinamento dos grãos tenha sido constatado, as explicações permanecem no campo hipotético. Para esclarecer os fenômenos envolvidos, análises mais aprofundadas são recomendadas.

5.3.2 Variação da amplitude de oscilação do arame – MAD

Além da frequência, a amplitude de oscilação do arame também foi analisada. Nesta segunda série de ensaios, a amplitude foi variada em 3, 5 e 10 mm e suas influências sobre a transferência metálica bem como sobre a geometria dos cordões foram analisadas. Além disso, as amplitudes foram avaliadas em duas frequências de oscilação, 6 e 9 Hz.

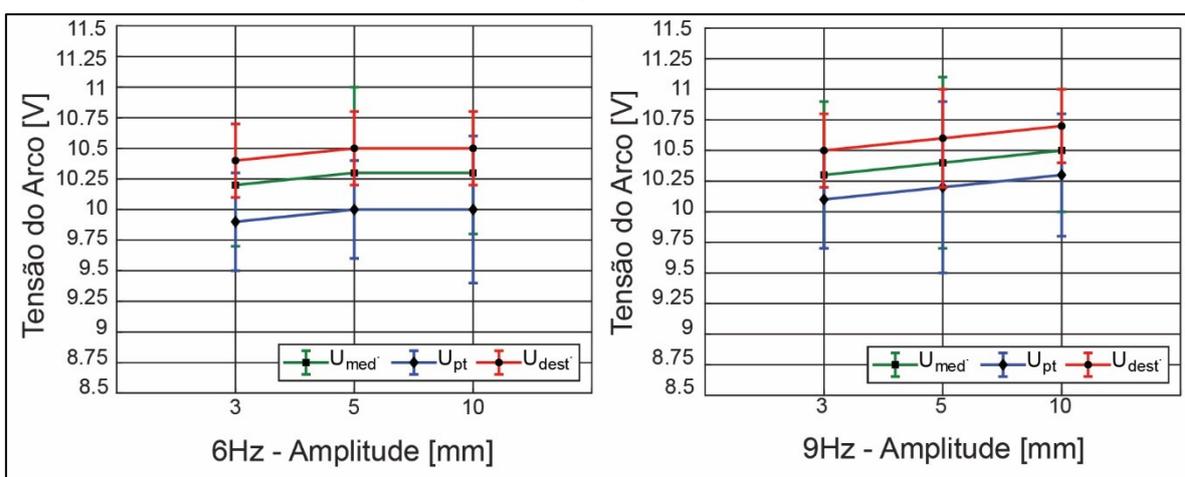
A tabela 24 mostra os valores médios de corrente média, tensão média e potência média do arco, bem como a velocidade de arame. Como pode ser visto, tanto para 6 quanto para 9 Hz, os valores médios de cada variável mantiveram-se bastante próximos. Entretanto, houve um pequeno incremento na tensão média para a frequência de 9 Hz, com exceção da amplitude de 5 mm, o que, por sua vez, refletiu num acréscimo da potência.

Tabela 29 – Valores médios de Corrente (I_{ARC}), Tensão média (U_{ARC}), Potência média (P_{ARC}) e Velocidade do arame média (VA_{med}) para a série de ensaios variando a amplitude de oscilação do arame.

Ensaio	I_{ARC} [A]	U_{ARC} [V]	P_{ARC} [W]	VA_{MED} [m/min]
6Hz – 3mm	180 ± 2	$10,2 \pm 0,5$	1809 ± 94	$1,47 \pm 6,52$
6Hz – 5mm	180 ± 2	$10,3 \pm 0,7$	1829 ± 122	$1,50 \pm 9,31$
6Hz – 10mm	179 ± 2	$10,3 \pm 0,5$	1839 ± 98	$1,48 \pm 20,01$
9Hz – 3mm	178 ± 1	$10,3 \pm 0,6$	1849 ± 105	$1,48 \pm 10,09$
9Hz – 5mm	180 ± 2	$10,4 \pm 0,7$	1863 ± 133	$1,53 \pm 18,35$
9Hz – 10mm	179 ± 1	$10,5 \pm 0,5$	1872 ± 95	$1,54 \pm 26,07$

Analisando os valores de tensão do arco, mostrados na Figura 116 e Tabela 30, assim como para a série anterior, a tensão do arco em ponte é inferior à tensão média, a qual por sua vez, é inferior à tensão do arco em condição de ponte destacada. Os valores tensão em ponte foram, em média, 0,2 V menor que a U_{ARC} e 0,4 V para U_D em ambas as frequências. Além disso, nota-se a tendência no aumento da tensão média com o aumento da amplitude de oscilação.

Figura 116 - Tensões do arco média (U_{ARC}), em ponte (U_P) e destacada (U_D) para série se ensaios variando a amplitude de oscilação do arame nas frequências de 6 e 9 Hz.



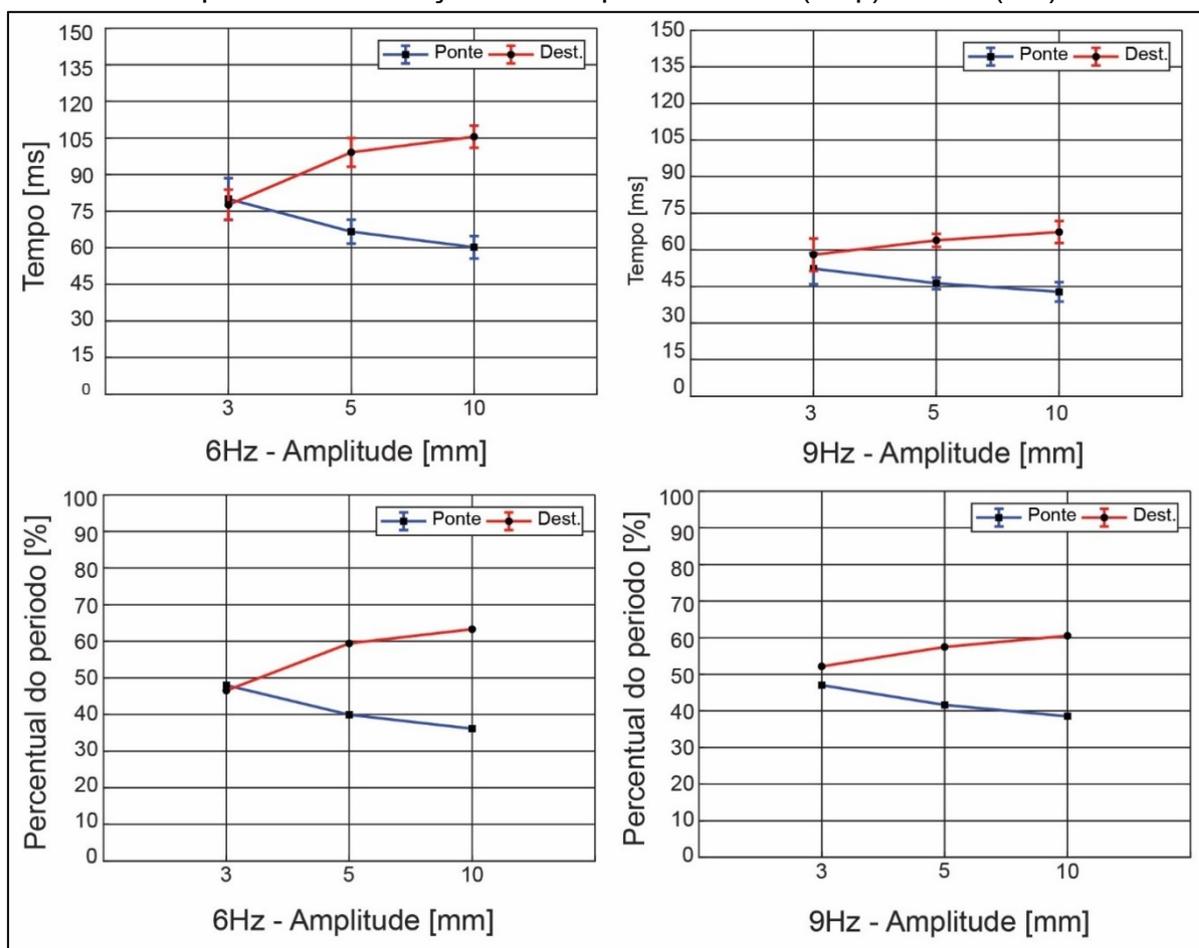
Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 30 - Tensões do arco para série se ensaios variando a amplitude de oscilação do arame.

Ensaio	U_P [V]	U_{ARC} [V]	U_D [V]
6Hz – 3mm	$9,9 \pm 0,4$	$10,2 \pm 0,5$	$10,4 \pm 0,4$
6Hz – 5mm	$10,0 \pm 0,4$	$10,3 \pm 0,7$	$10,5 \pm 0,3$
6Hz – 10mm	$10,0 \pm 0,6$	$10,3 \pm 0,5$	$10,5 \pm 0,4$
9Hz – 3mm	$10,1 \pm 0,4$	$10,3 \pm 0,6$	$10,5 \pm 0,3$
9Hz – 5mm	$10,2 \pm 0,7$	$10,4 \pm 0,7$	$10,6 \pm 0,4$
9Hz – 10mm	$10,3 \pm 0,5$	$10,5 \pm 0,5$	$10,7 \pm 0,3$

Observando os tempos em ponte e destacado, mostrados nos gráficos da Figura 117, assim como na série variando a frequências, entre 6 e 9 Hz, houve um decréscimo nos valores medidos, resultado dos menores períodos em frequências mais altas. Entretanto, ao contrário da influência do aumento da frequência, o aumento da amplitude de oscilação reduziu o período em ponte e aumentou o período em ponte destacada, resultando no aumento na diferença entre eles. Esta variação explica o aumento da tensão média do arco, visto que a tensão em ponte destacada é maior. Vale notar também que para a amplitude de 3 mm em 6 Hz, o tempo de ponte foi maior que em ponte destacada, diferente de todos os demais casos analisados, o que resultou no menor valor de tensão média na série.

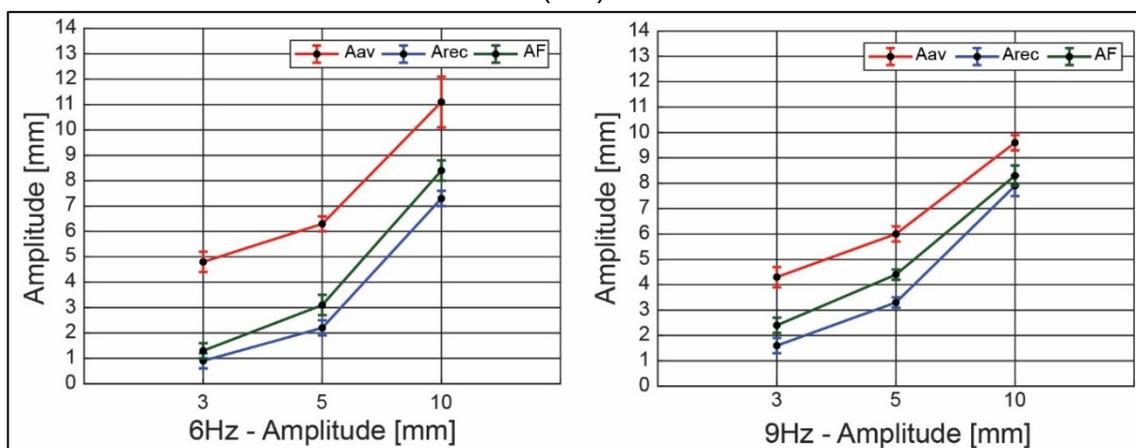
Figura 117 - Tempos em ponte e ponte destacada, e percentual do período para as condições em ponte e destacado. Valores referente à série de ensaios variando a amplitude de oscilação nas frequências de 6 (esq.) e 9 Hz (dir.).



Fonte: elaborado pelo autor.

O incremento no período em ponte destacada advém das maiores amplitudes de recuo medidas (Figura 118). Como pode ser observado, além do incremento com a frequência de 6 para 9 Hz, naturalmente a amplitude de recuo foi maior para maiores amplitudes de oscilações. Assim como para o recuo, a amplitude de avanço também aumentou. Ademais, nota-se que o afastamento máximo foi sempre maior que a amplitude de recuo, fenômeno também observado para a série anterior e explicado na seção 5.3.1. Para esta série de ensaios, o afastamento máximo foi em média 0,6 mm maior para a frequência de 6 Hz, e 0,8 mm para a frequência de 9 Hz.

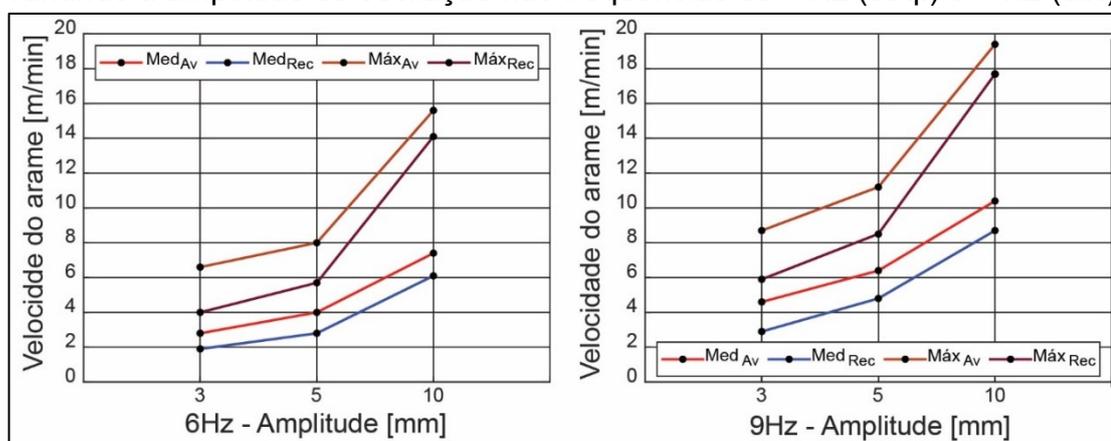
Figura 118 - Amplitude de avanço, recuo e afastamento máximo para a série variando a amplitude de oscilação do arame nas frequências de 6 Hz (esq.) e 9 Hz (dir.).



Fonte: elaborado pelo autor.

As maiores amplitudes de avanço e recuo refletiram no incremento das velocidades máximas e médias do arame, mostradas na Figura 119. Além da frequência, a velocidade de oscilação do arame varia em função da amplitude, conforme representado na equação (29). Para os casos com amplitude de 10 mm, as velocidades de pico atingiram valores muito maiores que a VA regulada (1,5 m/min), na ordem de 16 m/min para 6 Hz e 19 m/min para 9 Hz. Já as velocidades médias foram de 7,4 e 10,4 m/min para 6 e 9 H respectivamente.

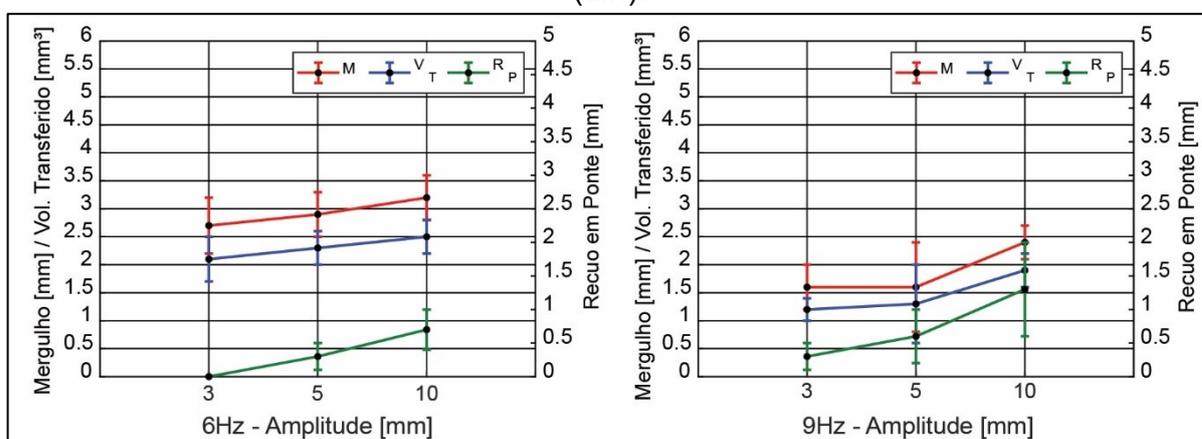
Figura 119 - Velocidades médias e máximas de avanço e recuo para a série variando a amplitude de oscilação nas frequências de 6 Hz (esq.) e 9 Hz (dir.).



Fonte: elaborado pelo autor.

Embora as velocidades e a amplitude de recuo tenham sido maiores, o que favorece a estabilidade do processo, por exemplo, na formação da gota na ponta do arame, no caso do aumento da amplitude de oscilação acarretou instabilidades por *stubbing*. Os gráficos mostrados na Figura 120 representam o mergulho do arame, o volume transferido e o recuo em ponte para esta série de ensaios. Conforme observado na série variando a frequência, o incremento desta variável reduziu comprimento de mergulho do arame. Este fenômeno também observado nesta série de ensaios quando compradas as frequências de 6 e 9 Hz. Entretanto, no caso da variação da amplitude, para 10 mm de amplitude de oscilação, em ambas as frequências o *stubbing* foi observado. Para os casos de 3 e 5 mm em ambas as frequências não foi observado a ocorrência de *stubbing*.

Figura 120 – Mergulho do arame (M), volume transferido (V_T) e recuo em ponte (R_P) para a série variando a amplitude de oscilação nas frequências de 6 Hz (esq.) e 9 Hz (dir.).

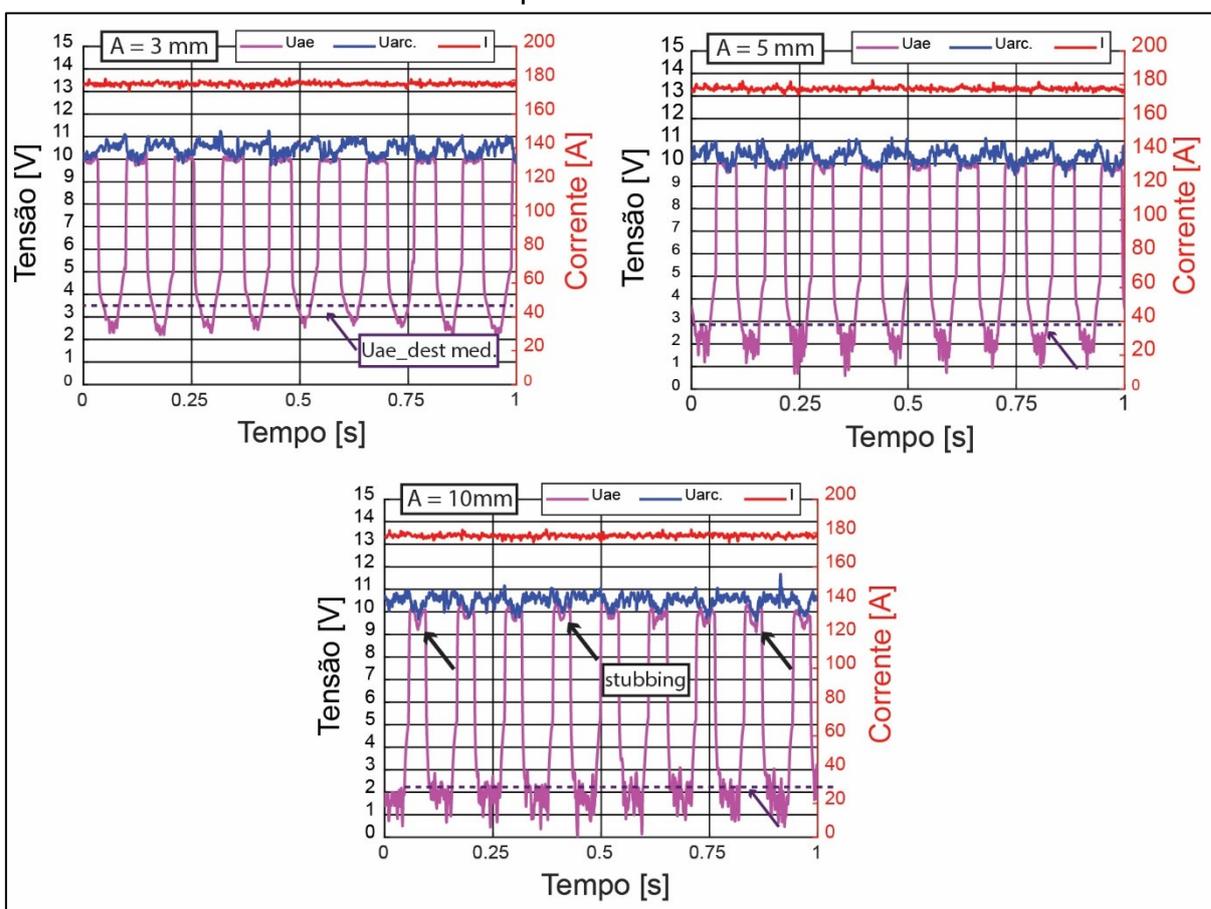


Fonte: elaborado pelo autor.

A Figura 121 mostra os oscilogramas dos ensaios realizados com 3, 5 e 10 mm de amplitude de oscilação do arame na frequência de 9 Hz. Conforme descrito na seção 5.2, a ocorrência do *stubbing* pode ser detectada pela queda do nível da tensão arame-eletrodo durante o período em ponte metálica. Para o caso de 3 mm e 5 mm, gráficos superiores, nota-se que U_{ae} manteve-se estável durante a fase de ponte metálica, caracterizando uma transferência metálica livre de *stubbing*. Já para a amplitude de 10 mm, oscilograma inferior, nota-se pequenas perturbações no sinal de tensão, destacados pelas setas em preto. Embora apenas alguns ciclos tenham sido

destacados na figura, o *stutting* foi presente em todos os demais ciclos de transferência metálica.

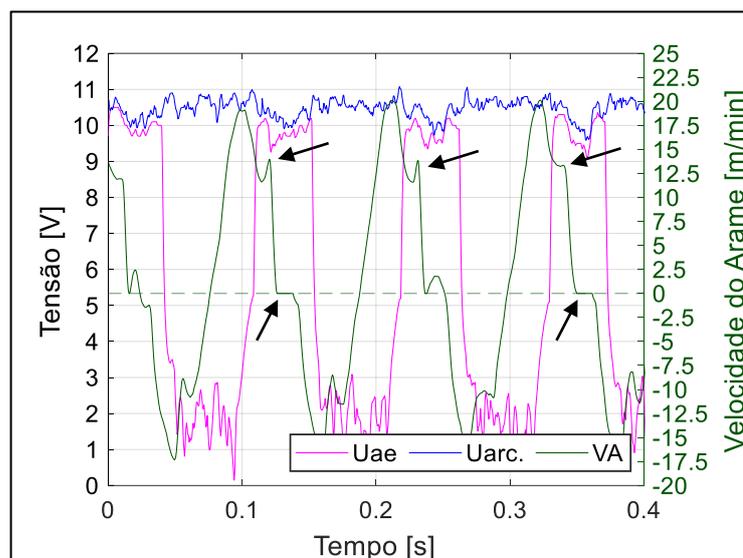
Figura 121 – Oscilograma de Corrente (I), tensão do arco (Uarc) e tensão arame-eletrodo (Uae) para as amplitudes de oscilação do arame de 3, 5 e 10 mm na frequência de 9 Hz.



Fonte: elaborado pelo autor.

A Figura 122 mostra em detalhe o oscilograma de tensão e VA para o ensaio AD em 9 Hz com amplitude de 10 mm. Nota-se que assim que o arame colide com o fundo da poça, a velocidade cai a valores bem próximos de zero, e por mais que o cabeçote continue a alimentar, ao invés de promover o mergulho do arame, este desloca a tocha para cima, caracterizando uma condição bastante instável.

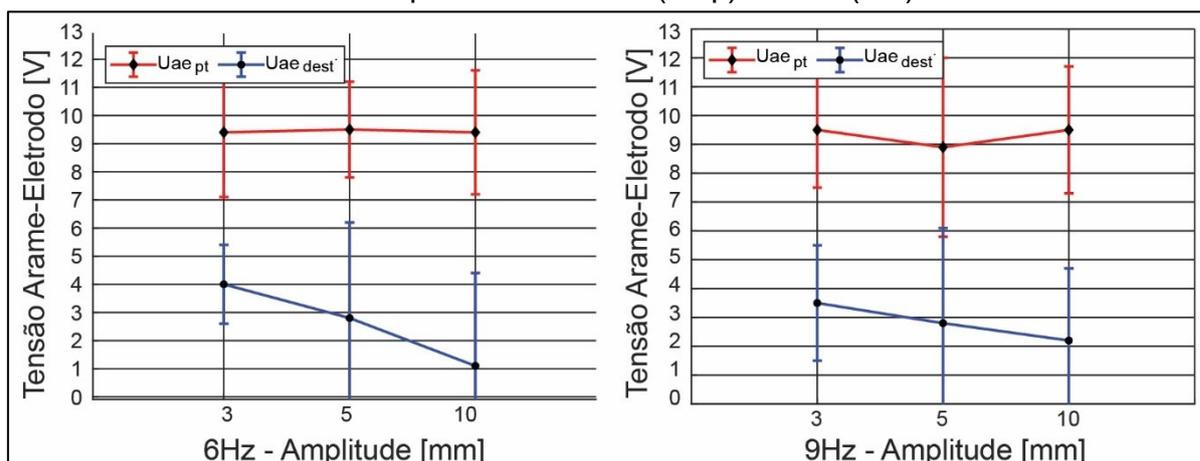
Figura 122 – Oscilograma de tensão e VA para ensaio à 9 Hz com amplitude de 10 mm.



Fonte: elaborado pelo autor.

Ainda nos oscilogramas da Figura 121, destacada pela linha tracejada, vê-se que a tensão arame-eletrodo média durante o período em ponte destacada foi diferente entre as amplitudes avaliadas. Para a amplitude de 3 mm, a tensão arame-eletrodo média durante o período de ponte destacada foi de 3,5 V. Já para a amplitude de 5 mm este valor foi de 2,8 V, enquanto para 10 mm foi de 2,2 V. A Figura 123 mostra as curvas da tensão arame-eletrodo para as duas frequências de oscilação. Assim como para 9 Hz, na frequência de 6 Hz a tensão arame-eletrodo também apresentou a tendência de diminuir com o aumento da amplitude. Conforme mostrado na Figura 59, a tensão arame-eletrodo é maior quando o arame se encontra mais próximo do arco. No caso de amplitudes menores, o recuo é menor, logo o arame se mantém próximo ao arco, resultando no maior valor para U_{AE} . Por outro lado, quanto maior a amplitude, maior o recuo e menor é a tensão arame-eletrodo durante o período destacado. A variação da tensão arame-eletrodo é explicada pelo grau de ionização do arco na região em que o arame se encontra, conforme discutido na seção 4.8

Figura 123 – Tensão arame-eletrodo para a série variando a amplitude de oscilação nas frequências de 6 Hz (esq.) e 9 Hz (dir.).



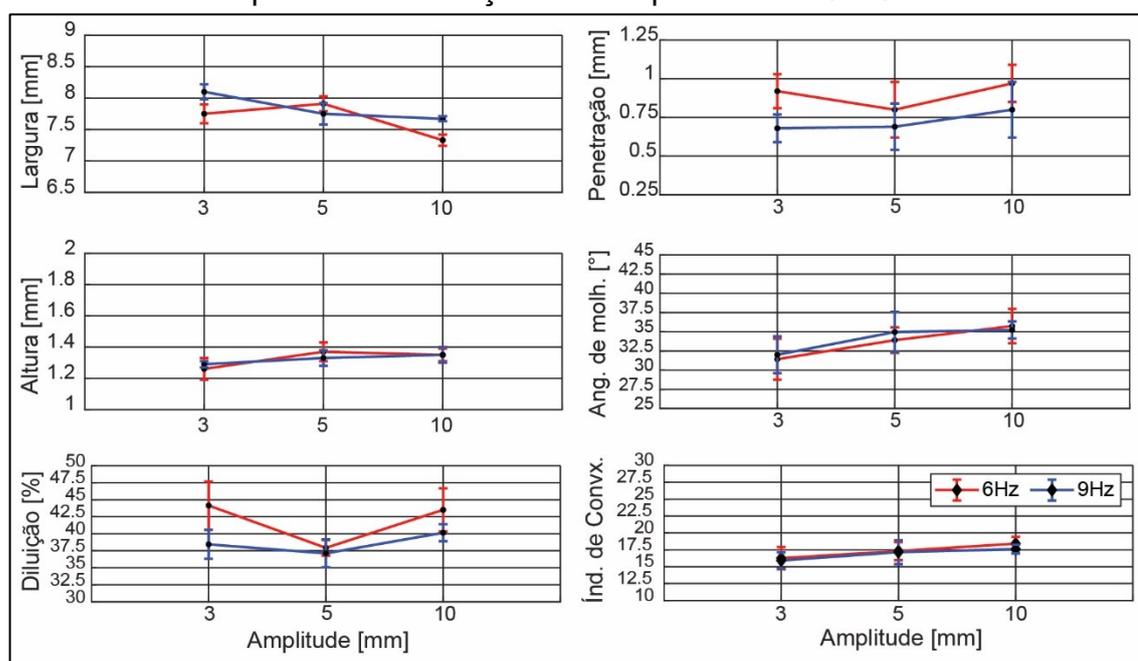
Fonte: elaborado pelo autor.

Além dos eventos que caracterizam a transferência metálica no processo TIG AD, a variação da amplitude também apresentou influências sobre o perfil geométrico dos cordões. A Figura 124 e a Tabela 31 mostram os valores medidos a partir das seções transversais dos cordões de solda, mostradas na Figura 125.

Analisando os resultados de largura do cordão, para 9 Hz nota-se a tendência em redução com o aumento da amplitude. Para 6 Hz, a amplitude de 5 mm apresentou uma largura maior que os demais ensaios. A redução da largura, por sua vez, acabou influenciando na altura do cordão. Para ambas as frequências, o aumento da amplitude aumentou a altura do reforço. O incremento no reforço está fortemente associado com o recuo em ponte metálica, o qual, por tensão superficial, acaba puxando o metal líquido para cima. Ademais, a aceleração, bem como a velocidade do arame são maiores para amplitudes maiores, contribuindo para este efeito. Por outro lado, embora a altura do reforço tenha aumentado, nota-se um incremento na penetração do cordão. Para ambas as frequências, a amplitude de 10 mm apresentou maior penetração. Este incremento pode estar associado ao mergulho do arame, sobretudo na ocorrência do *sticking*. Assim como para série de ensaios variando frequência, os testes onde houve ocorrência deste fenômeno resultaram numa maior penetração. Neste caso, levanta-se a hipótese de que o arame sólido ao chocar-se com o metal de base no fundo da poça promove a agitação do metal líquido, bem como do material parcialmente fundido, contribuindo para as trocas convectivas dentro da poça, o que, por sua vez, promoveria uma maior penetração. Além disso, o fato de

que maiores amplitude tenham apresentado um maior volume de material transferido por ciclo, o que, teoricamente, deveria reduzir a penetração pela quantidade de calor que é absorvido da poça de fusão, contribui com a hipótese acima. O aumento da penetração refletiu no aumento da diluição, com exceção do ensaio de 6 Hz com 5mm de amplitude, o qual apresentou a menor diluição da série. Por fim, a redução da largura e o aumento do reforço resultaram no incremento do ângulo de molhamento com o aumento da amplitude de oscilação. Cordões com menor molhabilidade apresentaram um maior índice de convexidade.

Figura 124 - Gráficos da variação geométrica dos cordões para a série variando amplitude de oscilação nas frequências de 6 e 9 Hz.

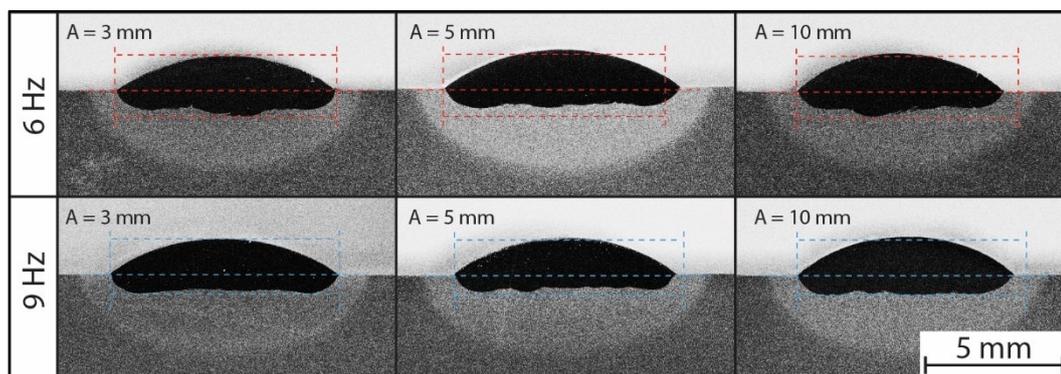


Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 31 - Valores médios das geometrias dos cordões de solda para a série variando amplitude de oscilação.

Ensaio	L [mm]	R [mm]	P [mm]	Am [°]	D [%]
6Hz – 3mm	7,75 ± 0,15	1,26 ± 0,07	0,92 ± 0,11	31,4 ± 2,6	44,1 ± 3,5
6Hz – 5mm	7,91 ± 0,12	1,37 ± 0,06	0,80 ± 0,18	33,9 ± 1,6	37,9 ± 1,14
6Hz – 10mm	7,33 ± 0,09	1,35 ± 0,04	0,97 ± 0,12	35,7 ± 2,2	43,1 ± 3,2
9Hz – 3mm	8,10 ± 0,12	1,29 ± 0,02	0,68 ± 0,09	32,0 ± 2,3	38,4 ± 2,1
9Hz – 5mm	7,75 ± 0,17	1,33 ± 0,05	0,69 ± 0,15	34,9 ± 2,6	37,1 ± 2,0
9Hz – 10mm	7,67 ± 0,04	1,35 ± 0,05	0,80 ± 0,18	35,2 ± 1,1	40,1 ± 1,2

Figura 125 - Macrografias dos cordões da série de ensaios variando amplitude de oscilação para as frequências de 6 Hz (superior) e 9 Hz (inferior). Amostras do centro do cordão (corte BB da Figura 46). Linhas tracejadas representam as dimensões dos ensaios em 3 mm.



Fonte: elaborado pelo autor.

Para avaliar os resultados das medições geométrica, nesta série de ensaios também foi utilizado o método estatístico de análise de variância (ANOVA). O resultado da análise mostra que a hipótese nula (H_0) pode ser rejeitada para o reforço, penetração e diluição na frequência de 6 Hz. Isto é, existe uma variação significativa na variação destas geometrias com a amplitude. Para a frequência de 9 Hz, H_0 pode ser rejeitada para largura, reforço, diluição e índice de convexidade. Para os demais casos, não se pode afirmar que houve variação significativa entre as amostras. A Tabela 32 mostra os valores de p para cada geometria nas frequências de 6 e 9 Hz. Lembrando que a hipótese nula é rejeitada quando valores de p são inferiores à 0,05.

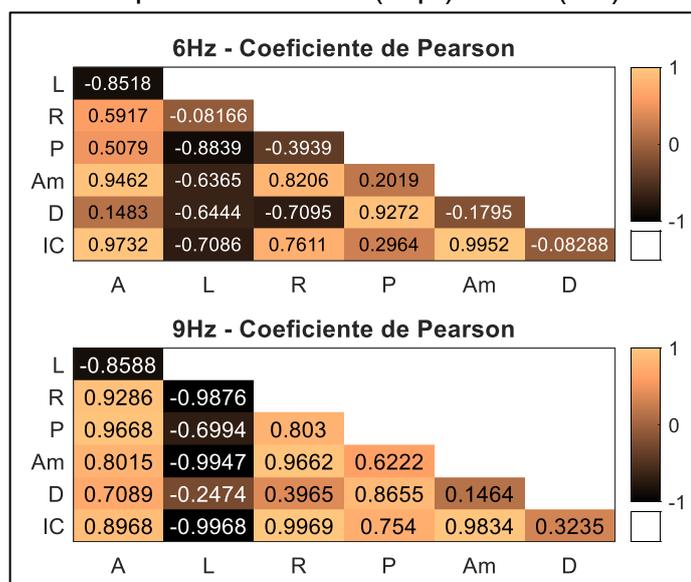
Tabela 32 - Valores de p -value referentes ao método ANOVA aplicado sobre os resultados geométricos da série variando a amplitude de oscilação nas frequências de 6 e 9 Hz.

	Freq.	Largura	Reforço	Penetração	Ângulo de Molh.	Diluição	Índice de convexidade
p -value	6 Hz	0,1525	0,0039	0,0453	0,1926	0,0232	0,1005
p -value	9 Hz	0,0250	0,0249	0,0901	0,0604	0,0087	0,0077

Diferentemente do método de Spearman que fora aplicado na série de variação da frequência, nesta série de ensaios foi aplicado o método de correlação de Pearson. Embora ambos os métodos avaliem correlações entre variáveis monotônicas, o método de Pearson é recomendado no caso de correlações lineares, sendo mais recomendado para os resultados obtidos nesta série. A Figura 126 mostra mapa de

calor dos coeficientes obtidos para as duas frequências analisadas. Na frequência de 6 Hz, a variação da amplitude apresentou forte correlação ($>0,7$) com a Largura do cordão, ângulo de molhamento e índice de convexidade. Para reforço e penetração a correlação foi moderada, enquanto para diluição, a correlação foi baixa. Já para a frequência de 9 Hz, a variação da amplitude apresentou forte correlação com todas as geometrias. É interessante notar que as correlações da amplitude com as demais variáveis foram todas positivas com exceção da largura, a qual foi negativa.

Figura 126 - Coeficientes de correlação de Spearman da frequência com valores geométricos dos cordões da série de ensaios variando a amplitude de oscilação nas frequências de 6Hz (sup.) e 9 Hz(inf.).



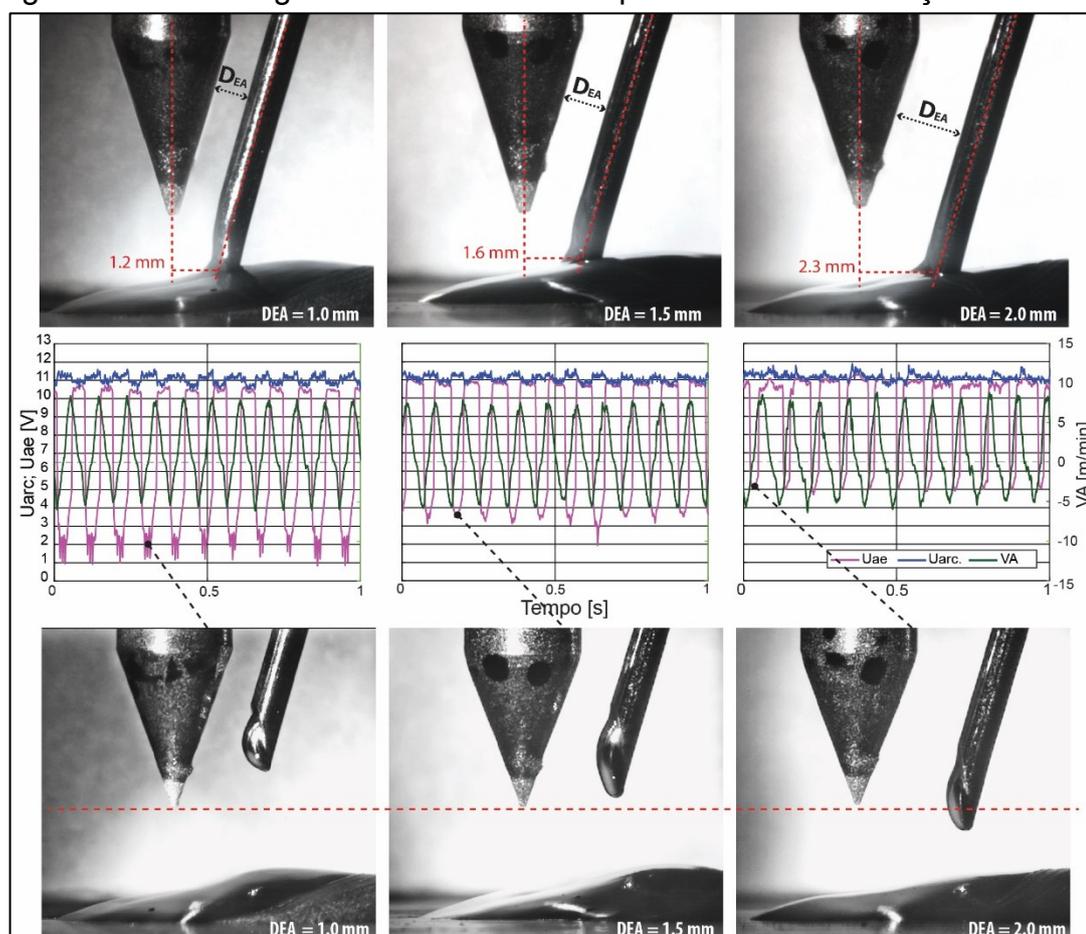
Fonte: elaborado pelo autor.

5.3.3 Variação da distância eletrodo arame (DEA)

Conforme foi mostrado ao longo do desenvolvimento deste trabalho, a tensão entre o arame e eletrodo varia de acordo com a posição relativa ao arco em que o arame se encontra. Na série variando a amplitude de oscilação, maiores amplitudes, sobretudo amplitude de recuo, levam a uma menor tensão arame-eletrodo no período de ponte destacada. Entretanto, notou-se que o afastamento do arame ao eletrodo também apresentou alterações na tensão. Nesse contexto, esta série de ensaios teve o objetivo de avaliar o comportamento da tensão arame-eletrodo em diferentes condições de DEA: 1,0, 1,5, e 2,0 mm.

A Figura 127 representa os oscilogramas de tensão do arco, tensão arame-eletrodo e VA para as três DEA avaliadas. Conforme pode ser visto, a posição em que o arame toca na poça é diferente para cada condição (quadros superiores), e quanto maior a DEA, mais próxima da linha de fusão na região traseira da poça de fusão ocorre a ponte metálica. Entretanto, a região mais afastada é também a região de menor temperatura e durante o avanço do arame e, para a condição de 2,0 mm, ocorreu o *stutting* de maneira severa, ocasionando até o deslocamento da tocha para cima devido a força do arame no fundo da poça. Este fenômeno pode ser observado no breve aumento da tensão do arco durante o período de ponte metálica (oscilograma à direita da Figura 127).

Figura 127 – Oscilogramas de tensão e VA para diferentes condições de DEA.



Fonte: elaborado pelo autor.

Ainda na Figura 127, é possível notar o comportamento distinto da tensão do arco nas diferentes condições. Para o caso de menor DEA, a variação da tensão entre os períodos de ponte e destacado é mais acentuada que para maior condição, isto

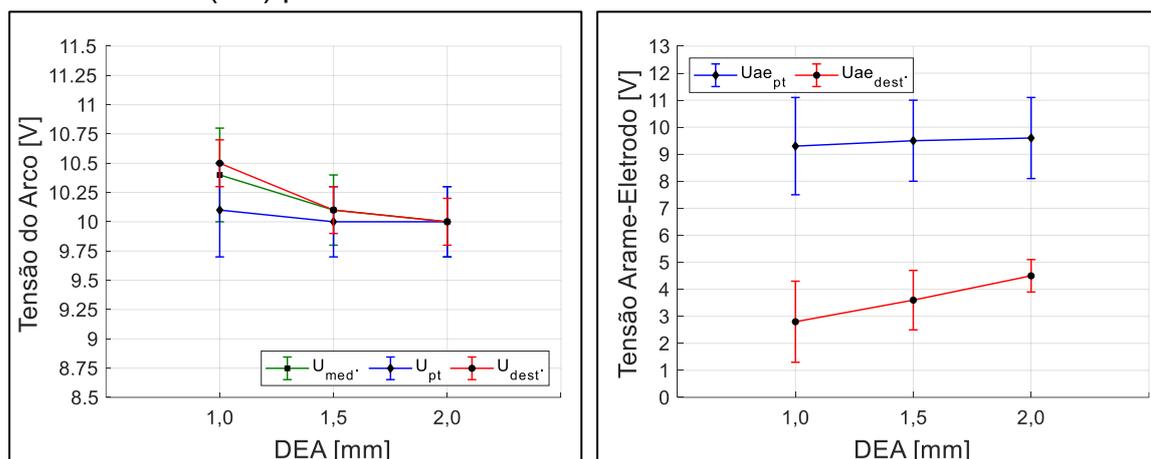
porque o encurtamento do arco é mais expressivo quando o arame se encontra mais próximo do eletrodo. Neste caso, a diferença de U_{PT} e U_D foi de 0,4 V, enquanto para 2,0 mm praticamente não houve diferença. Esta variação da tensão acarretou numa alteração dos valores médios de potência do arco, sendo que na condição de 1,0 mm foi ligeiramente superior. A Tabela 33 mostra os valores médios dos sinais elétricos adquiridos.

Tabela 33 – Valores médios dos sinais elétricos adquiridos para a série de ensaios variando a DEA

	DEA 1,0	DEA 1,5	DEA 2,0
I [A]	178 ± 2	179 ± 1	178 ± 2
U_{ARC} [V]	10,4 ± 0,4	10,2 ± 0,3	10,1 ± 0,3
P [W]	1843 ± 78	1791 ± 45	1776 ± 49
U_{Pt} [V]	10,1 ± 0,4	10,0 ± 0,3	10,0 ± 0,3
U_D [V]	10,5 ± 0,2	10,2 ± 0,2	10,1 ± 0,2
P_{Pt} [W]	1803 ± 65	1783 ± 47	1774 ± 51
P_D [W]	1874 ± 36	1804 ± 32	1785 ± 37
$U_{AE,P}$ [V]	9,3 ± 1,8	9,5 ± 1,5	9,6 ± 1,5
$U_{AE,D}$ [V]	2,8 ± 1,5	3,6 ± 1,1	4,5 ± 0,6

Os sinais de tensão arame-eletrodo também mostram variações nos valores médios, sobretudo na condição de ponte destacada (Figura 128). Conforme pode ser visto, a condição de menor DEA apresentou o menor valor para $U_{AE,D}$. Os quadros inferiores da Figura 127 mostram que para DEA de 1,0 mm o recuo do arame foi ligeiramente maior que para 1,5 mm, e notavelmente superior que para 2,0 mm, mesmo que a amplitude e frequência de oscilação do arame tenham sido as mesmas para os três ensaios. O menor valor de tensão para DEA de 1,0 mm advém pelo fato de que em posições mais afastadas, o arame encontra-se em regiões mais remotas do arco com, entretanto ainda ionizadas, conforme apresentado na seção 4.8.

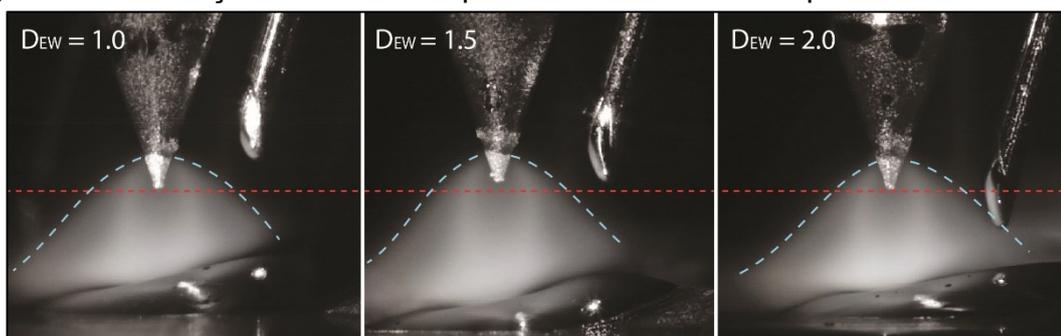
Figura 128 – Variação dos sinais de tensão do arco (esq.) e tensão arame-eletrodo, (dir.) para os ensaios realizados com diferentes DEA.



Fonte: elaborado pelo autor.

No caso da maior distância eletrodo-arame, no ponto de máximo recuo, o arame encontra-se mais próximo do arco, conforme pode ser visto na Figura 129. Além do arame estar imerso no arco, pela lei de Ohm, a maior DEA naturalmente resultaria em uma maior tensão arame-eletrodo.

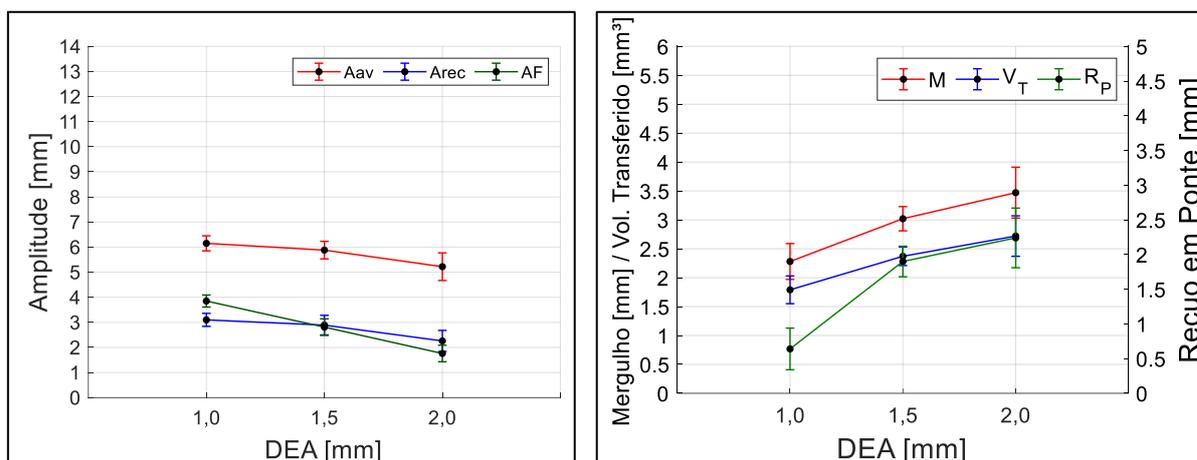
Figura 129 – Posição do arame no ponto de máximo recuo para diferentes DEAs.



Fonte: elaborado pelo autor.

Na Figura 130 à esquerda, a amplitude de avanço e recuo são praticamente iguais nas condições de 1,0 e 1,5 mm. Entretanto, para 2,0 mm nota-se que tanto A_{AV} quanto A_R são menores. Este resultado advém do evento já destacado, onde, na ocorrência do *sticking*, o arame empurrou a tocha para cima, deslocando todo o sistema. Assim sendo, a redução da velocidade de avanço levou a um menor valor da amplitude de avanço. No movimento de recuo, até que a tocha voltasse para a posição inicial, o recuo do arame era reduzido, logo A_R também foi comprometida.

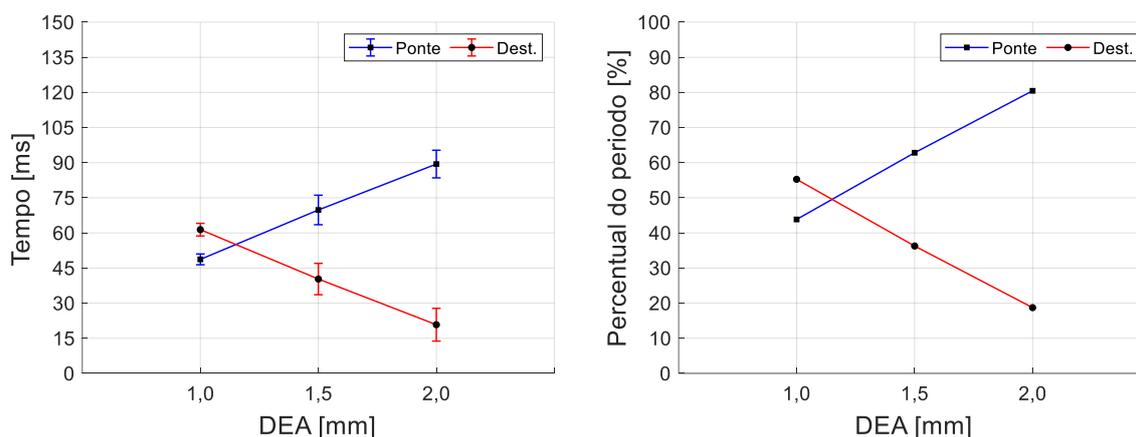
Figura 130 - Amplitude de avanço / recuo e afastamento máximo (esq.) e mergulho do arame, recuo e ponte e volume transferido (dir.) para os ensaios realizados com diferentes DEA.



Fonte: elaborado pelo autor.

Este mesmo raciocínio pode ser estendido para explicar as medições de recuo em ponte, o qual foi maior para a condição de 2.0 mm (gráfico à direita da Figura 130). Ademais, o gráfico mostra que do mergulho do arame foi maior para maiores DEA, lembrando que este parâmetro está relacionado ao comprimento de arame avançado durante o período em ponte, não necessariamente no estado sólido. Entretanto, o afastamento do arame do eletrodo o coloca em regiões de menor energia da poça e do arco, reduzindo assim a capacidade de fusão do processo. Fato este que levou ao *stubbing* severo na condição de 2,0 mm. Pelos gráficos da Figura 131, nota-se também que o tempo em ponte aumenta com a DEA e, para 1,5 e 2,0 mm, o período em ponte foi maior que a para a condição destacada. Em 1,0 mm, o período em ponte destacada é superior. A maior capacidade de fusão leva ao rompimento antecipado da ponte metálica, levando a maiores amplitudes recuo e afastamento máximo da poça.

Figura 131 - Tempos em ponte e ponte destacada (esq.) e, percentual do período (dir.) para diferentes DEA.



Fonte: elaborado pelo autor.

Os resultados apresentados nesta seção associados aos obtidos na seção anterior (série variando amplitude), mostram que a partir da aquisição dos sinais, sobretudo de tensão do eletrodo, bem como as variáveis de deslocamento medidas, aspectos relacionados ao posicionamento do arame podem ser muito bem monitorados. A alimentabilidade do arame é fortemente influenciada por alguns fatores externos tais como disposição do conduíte, folga entre arame e conduíte, variação do raio de bobinamento do arame à medida que este é consumido, desgaste do bico direcionador de arame, entre outros, os quais levam a um mal comportamento na oscilação do arame, bem como no direcionamento incorreto do mesmo. O processo TIG, embora robustos, apresenta elevada sensibilidade, e pequenas alterações no direcionamento do arame, por exemplo, são facilmente percebidas nos dados aquisitados.

5.3.4 Variação da frequência de oscilação para diferentes níveis de corrente

A fim de avaliar se os efeitos da alimentação dinâmica sobre geometria e transferência metálica em diferentes níveis de energia, além da corrente de 180 A, a frequência de oscilação do arame foi avaliada em outros dois níveis de corrente de soldagem, 110 A e 250 A. Conforme mencionado na seção 4.9.3, a relação entre velocidade de arame e potência foi a mesma nos três níveis de corrente.

A Tabela 34 mostra os valores médios de tensão do arco, potência e VA para toda a série de ensaios e, assim como as series anteriores, os valores médios são bastante próximos entre os ensaios de mesmo nível de corrente de soldagem, principalmente para a corrente de 110 A.

Tabela 34 - Valores médios de Corrente (I_{ARC}), Tensão média (U_{ARC}), Potência média (P_{ARC}) e Velocidade do arame média (VA_{med}) para os ensaios realizados em diferentes níveis de corrente e frequência de oscilação.

Ensaio	I_{ARC} [A]	U_{ARC} [V]	P_{ARC}	VA_{MED} [m/min]
110 A – Pt_ct (AC)	110 ± 2	8,4 ± 0,3	913 ± 39	0,63 ± 0,45
110 A – 3 Hz	111 ± 2	8,4 ± 0,4	922 ± 51	0,64 ± 5,23
110 A – 6 Hz	109 ± 2	8,4 ± 0,4	923 ± 49	0,67 ± 9,31
110 A – 9 Hz	110 ± 2	8,5 ± 0,4	943 ± 43	0,62 ± 15,01
180 A – Pt_ct (AC)	179 ± 2	9,9 ± 0,3	1703 ± 54	1,56 ± 0,52
180 A – 3 Hz	179 ± 2	10,3 ± 0,6	1845 ± 126	1,54 ± 4,52
180 A – 6 Hz	179 ± 1	10,4 ± 0,7	1829 ± 122	1,55 ± 9,31
180 A – 9 Hz	178 ± 2	10,4 ± 0,6	1873 ± 133	1,53 ± 14,01
250 A – Pt_ct (AC)	249 ± 1	10,8 ± 0,4	2714 ± 68	2,49 ± 0,81
250 A – 3 Hz	248 ± 1	11,1 ± 0,9	2717 ± 198	2,48 ± 5,81
250 A – 6 Hz	249 ± 2	11,1 ± 0,7	2718 ± 180	2,51 ± 10,35
250 A – 9 Hz	248 ± 1	11,0 ± 0,6	2725 ± 150	2,46 ± 13,07

Se observarmos os valores da tensão do arco para as diferentes condições de transferência metálica (ponte e destacado), mostradas na Tabela 35, nota-se que para a corrente de 110A os valores da tensão em ponte e destacado quase não apresentaram variação, com diferença média de 0,1 V. Neste nível de corrente a variação do comprimento do arco pelo ancoramento sobre arame, não alterou significativamente a tensão do arco. Por outro lado, para o maior nível de corrente, os resultados mostram que a tensão em ponte foi, em média, 0,7 V menor que a tensão em ponte destacada. Já para os ensaios em nível intermediário (180 A), a diferença média foi de 0,5 V. Este resultado mostra que a variação do comprimento do arco pelo ancoramento no arame durante o período em ponte, tem maior significância na variação da tensão em níveis mais elevados de corrente. Resultado este que pode ser explicado pelo comportamento das curvas estáticas do processo TIG, conforme

apresentado por Dutra [84] e Marques et al. [85], onde a variação da tensão pelo comprimento do arco é maior em correntes mais altas.

Com relação ao ensaio com alimentação convencional em ponte contínua, para que fosse mantida a ponte metálica, a DEA teve de ser aumentada para 1,2 mm. Entretanto, comparando com os valores de tensão em ponte (Tabela 35) para os ensaios com AD, o aumento da DEA não teve forte influência sobre a tensão média do arco, e apenas para o ensaio com 250 A, este valor foi ligeiramente maior, na ordem de 0,1 V.

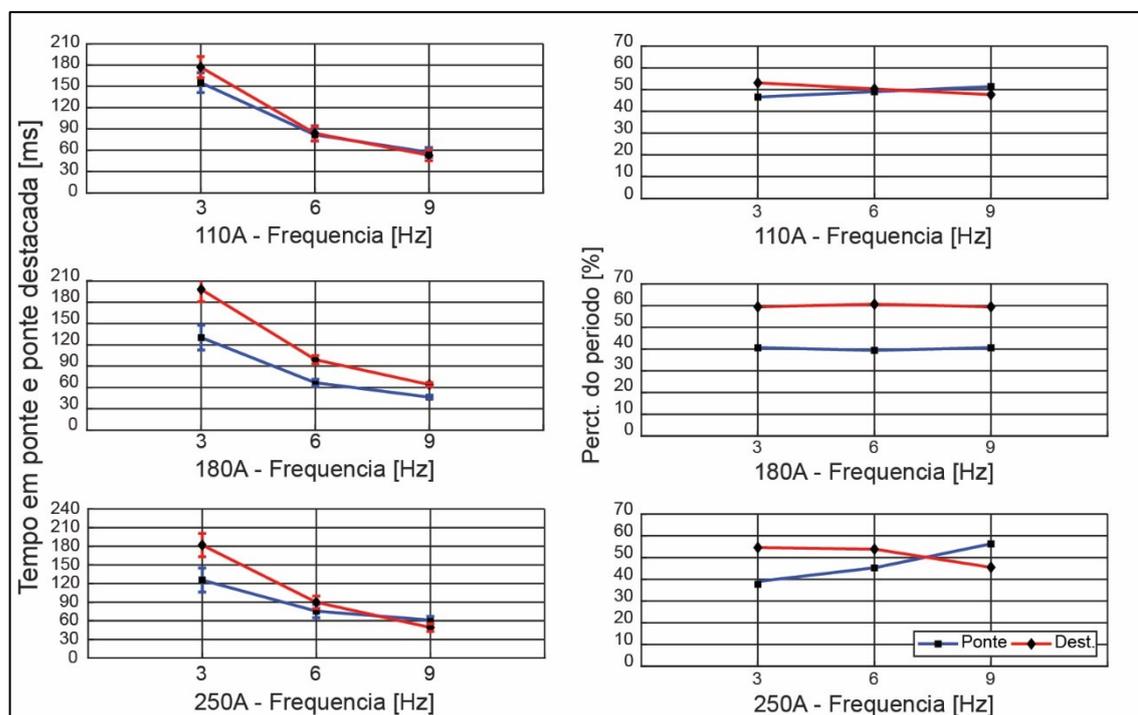
Tabela 35 - Tensões do arco para série de ensaios de ensaios com diferentes níveis de corrente de soldagem.

Ensaio	U_P [V]	U_{ARC} [V]	U_D [V]
110 A – Pt_ct (AC)	-	$8,3 \pm 0,2$	-
110 A – 3 Hz	$8,4 \pm 0,4$	$8,4 \pm 0,4$	$8,5 \pm 0,4$
110 A – 6 Hz	$8,4 \pm 0,5$	$8,4 \pm 0,5$	$8,5 \pm 0,5$
110 A – 9 Hz	$8,5 \pm 0,4$	$8,5 \pm 0,4$	$8,6 \pm 0,4$
180 A – Pt_ct (AC)	-	$9,8 \pm 0,3$	-
180 A – 3 Hz	$9,9 \pm 0,5$	$10,3 \pm 0,6$	$10,5 \pm 0,4$
180 A – 6 Hz	$10,1 \pm 0,4$	$10,4 \pm 0,7$	$10,6 \pm 0,4$
180 A – 9 Hz	$10,1 \pm 0,7$	$10,4 \pm 0,6$	$10,6 \pm 0,3$
250 A – Pt_ct (AC)	-	$10,8 \pm 0,2$	-
250 A – 3 Hz	$10,6 \pm 0,5$	$11,1 \pm 0,9$	$11,3 \pm 0,3$
250 A – 6 Hz	$10,7 \pm 0,7$	$11,1 \pm 0,7$	$11,2 \pm 0,4$
250 A – 9 Hz	$10,8 \pm 0,5$	$11,0 \pm 0,6$	$11,4 \pm 0,3$

Avaliando os tempos em ponte e ponte destacada (Figura 132), nota-se que para os ensaios a 110 A, os períodos foram bastante próximos. Entretanto, para a frequência de 9 Hz, houve uma inversão no percentual de cada período, sendo maior para a condição em ponte. Este mesmo comportamento foi presente para o ensaio com 250 A, e observando os valores de U_{ARC} para os ensaios à 9 Hz em 110 A e 250 A, nota-se que o valor é mais próximo de U_{PT} , visto que o tempo em ponte foi maior. Já para 180 A o tempo em ponte destacado foi sempre superior ao tempo em ponte, e percentual manteve-se próximo entre as frequências. Voltando aos resultados da série de ensaios variando a frequência (seção 5.3.1), mesmo para as frequências mais

elevadas, não houve a inversão dos períodos, e o tempo em ponte metálica foi menor que o tempo em ponte destacada para todas as condições.

Figura 132 - Tempos em ponte e ponte destacada (esq.) e Percentual do período (dir.) para os ensaios realizados em diferentes níveis de corrente de soldagem.

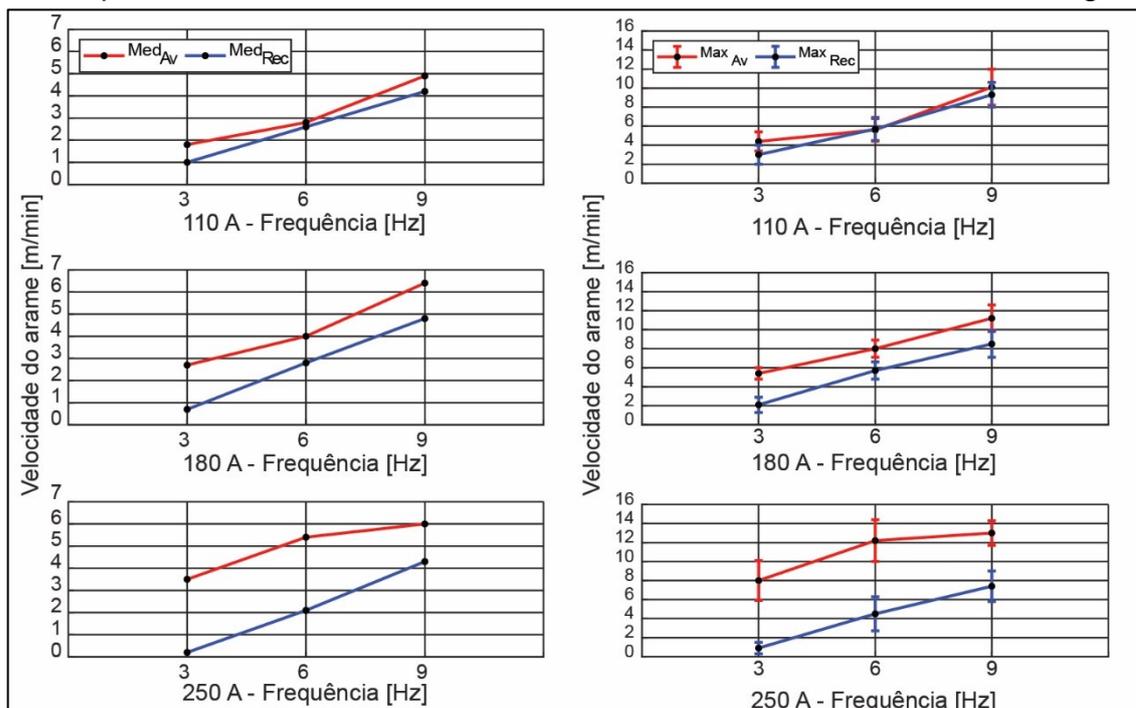


Fonte: elaborado pelo autor.

A proximidade dos tempos em ponte e ponte destacada para a corrente de 110 A pode ser explicada pela baixa taxa de fusão, visto menor energia do arco. Embora fosse utilizado a relação de V_a/P para definir as velocidades de alimentação (seção 4.9.3), durante a inversão do movimento do arame, independente da corrente de soldagem, a velocidade do arame é baixa, chegando a valores nulos. Assim sendo, quanto menor a potência do arco, menor será a capacidade de fusão do arame, e a ponte metálica perdura por mais tempo. Para o caso de 6 e 9 Hz, os tempos foram praticamente iguais enquanto em 3 Hz o período destacado foi ligeiramente superior.

Considerando as velocidades de avanço e recuo do arame, uma vez que a componente oscilatória da velocidade é igual nos três níveis de corrente utilizado, para o caso de menor velocidade de alimentação (110 A – 0,7 m/min), V_{Av} e V_{Rec} acabam sendo próximas (Figura 133). À medida que a componente constante da V_a aumenta, casos de 180 e 250 A, as velocidades de avanço aumentam e as de recuo diminuem.

Figura 133 – Velocidades médias (esq.) e máximas (dir.) de avanço e recuo do arame para os ensaios realizados em diferentes níveis de corrente de soldagem.

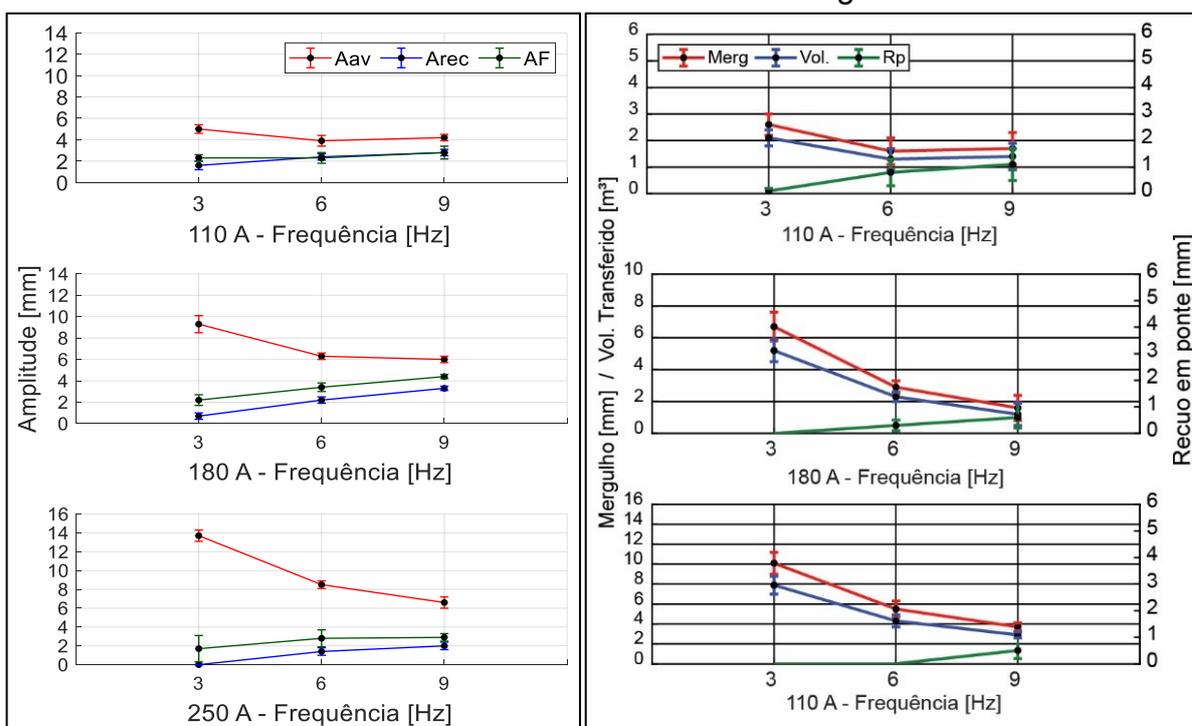


Fonte: elaborado pelo autor.

Associando o comportamento das velocidades do arame com as amplitudes de avanço e recuo, nota-se que o caso de maior VA_{AV} (250 A) apresentou maior amplitude de avanço (Figura 134). Por outro lado, esta condição teve a menor amplitude de recuo, visto que VA_{REC} também foi menor. É interessante notar que mesmo que a amplitude de recuo tenha sido menor, bem como o afastamento máximo, o período em ponte foi menor. Ademais, os gráficos à direita da Figura 134 mostram que nesta condição não houve recuo em ponte para as frequências de 3 e 6 Hz. A mesma explicação utilizada anteriormente sobre os ensaios realizados com 110 A pode ser utilizada aqui. Porém neste caso, a elevada energia do arco promove a ruptura antecipada da ponte metálica durante os momentos de baixa velocidade de arame. Os oscilogramas mostrados na Figura 135 representam os ensaios com 110 A e 250 A. Conforme pode ser visto, para as frequências de 3 e 6 Hz à 250 A não há movimento de recuo em ponte metálica, diferente dos ensaios com 110 A em que todas as condições apresentam recuo em ponte. Vale observar que a VA_{REC} para os ensaios a 110 A foi sempre superior ao valor de VA regulado (0,7 m/min). Para 180 A em 3 Hz, VA_{REC} foi inferior à VA (1,6 m/min), enquanto em 250 A tanto em 3 quanto em 9 Hz a velocidade média de recuo foi menor que VA (2,2 m/min). Estes resultados

mostram que quanto maior a corrente de soldagem e/ou energia do arco, para que haja recuo em ponte metálica é necessário parametrização que granta uma VA_{REC} superior à VA regulada na fonte, neste caso, a frequência mínima para recuo em ponte é superior.

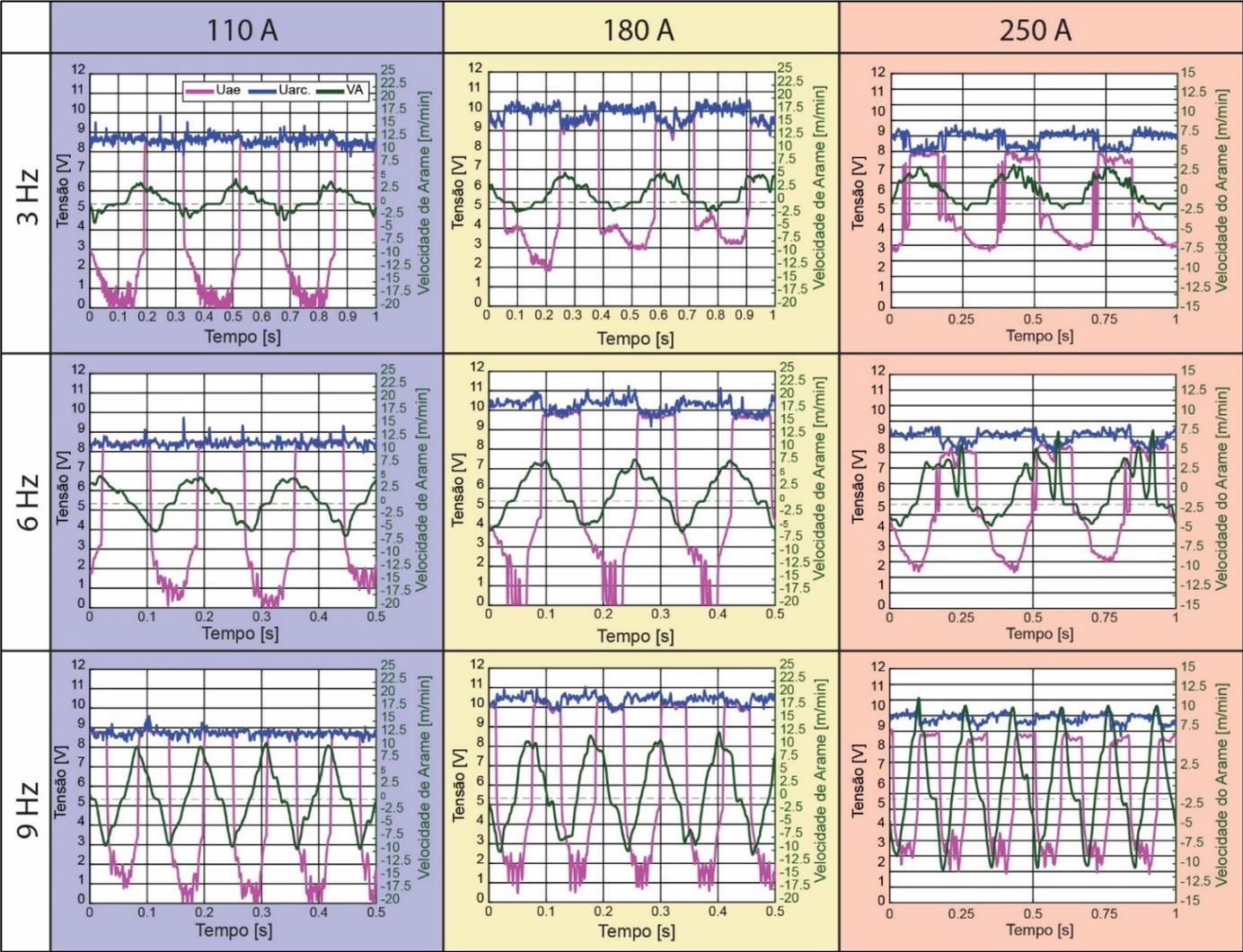
Figura 134 - Amplitude de avanço / recuo e afastamento máximo (esq.) e mergulho do arame, recuo e ponte e volume transferido (dir.) para os ensaios realizados em diferentes níveis de corrente de soldagem.



Fonte: elaborado pelo autor.

Ainda nos oscilogramas da Figura 135, para as condições de 3 e 6 Hz em 250 A houve destacamento de gota antes do estabelecimento da ponte metálica, o qual pode ser observado a partir na variação do sinal de U_{AE} . Uma vez que, tanto VA_{AV} quanto VA_{REC} são menores em frequências mais baixas, o tempo de formação de gota, durante o período destacado, acaba sendo superior, levando a formação de uma gota maior na ponta do arame, a qual é rapidamente transferida à poça fundida, conforme comentado na seção 5.3.1. Logo após o destacamento da gota a ponte metálica é estabelecida. Para a condição de 9 Hz não houve destacamento de gota anteriormente à ponte metálica. Além dos destacamentos de gota, nota-se a ocorrência de *sticking* em 3 e 6 Hz.

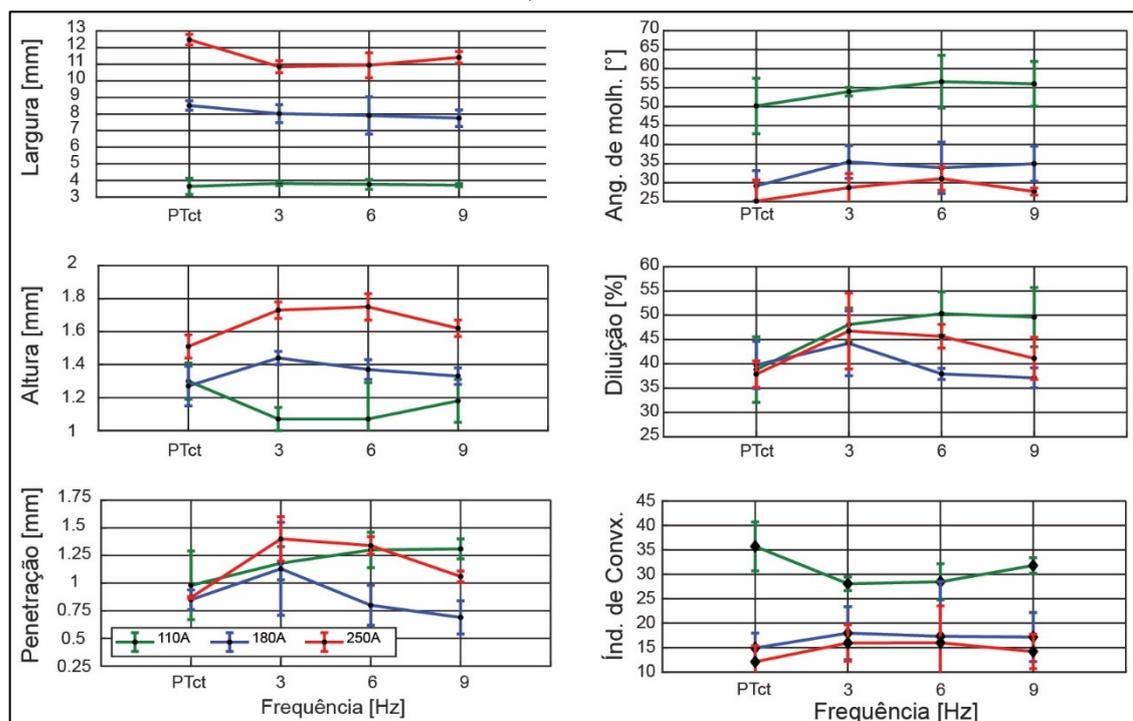
Figura 135 – Oscilogramas de tensão e VA para os ensaios realizados em 110, 180 e 250 A



Fonte: elaborado pelo autor.

Analisando a geometria dos cordões, cujas macrografias são mostradas na Figura 137 e valores médios mostrados nos gráficos da Figura 136 e na Tabela 36, nota-se que a variação com frequência de oscilação foi distinta para cada nível de corrente. Iniciando pela largura do cordão, é possível observar que na condição de alimentação dinâmica não houve grandes variações nos valores médios no nível de 110 A e, pela análise de variância (ANOVA), o valor-p encontrado sugere que a hipótese nula não pôde ser rejeitada, o que significa que não houve uma variação significativa entre as médias obtidas, incluindo o ensaio em AC. Já para as correntes de 180 e 250 A, a largura para a condição AC foi inferior à dos cordões em AD, entretanto, o aumento da frequência mostra leve tendência em reduzir esta dimensão. Analisando os resultados da altura do cordão nota-se o inverso da variação da largura. No caso de menor energia, a altura do cordão foi maior para alimentação convencional, reduzindo para 3 e 6 Hz e voltando a aumentar em 9 Hz. Para 180 A, o reforço foi menor para o ensaio com alimentação convencional, entretanto, entre os ensaios em AD, esta dimensão diminuiu com o aumento da frequência. Este comportamento se repetiu com corrente de 250 A, entretanto, para os ensaios de 3 e 6 Hz o reforço foi praticamente igual. Vale notar que para as frequências de 3 e 6 Hz, não houve recuo em ponte, enquanto para 9 Hz sim, porém, nas frequências mais baixas foi notado a presença do stubbing, conforme comentado. Neste caso o recuo em ponte não inferiu num maior reforço do cordão, e o fato do arame ter sido “enterrado” pelo stubbing, sugere-se que a presença do arame sólido dentro da poça de fusão tenha forte influência sobre o balanço térmico da poça, reduzindo a temperatura da na região central da poça, aumentando a força da tensão superficial no sentido de puxar a poça, justificando a menor largura e maior reforço nestas condições.

Figura 136 - Gráficos da variação geométrica dos cordões para a série com corrente de 110, 180 e 250 A.



Fonte: elaborado pelo autor.

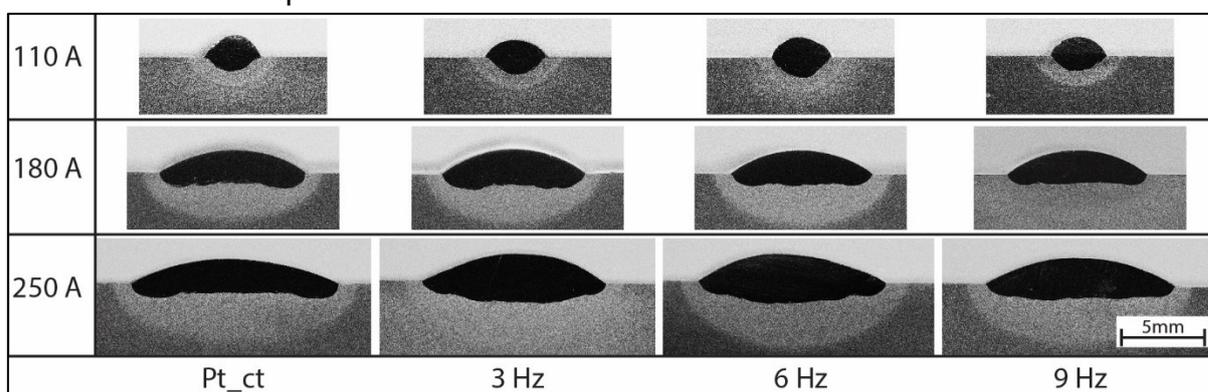
Tabela 36 - Valores geométricos dos cordões de solda para a série com correntes de 110, 180 e 250 A.

Ensaio	L [mm]	R [mm]	P [mm]	Am [°]	Dil. [%]
110 A – Pt_ct (AC)	3.64 ± 0.49	1,3 ± 0,11	0,98 ± 0,31	50,18 ± 7,30	38,82 ± 6,75
110 A – 3 Hz	3.81 ± 0.12	1,07 ± 0,07	1,18 ± 0,15	53,94 ± 1,13	48,08 ± 3,44
110 A – 6 Hz	3.76 ± 0.30	1,07 ± 0,22	1,30 ± 0,16	56,55 ± 6,94	50,34 ± 4,46
110 A – 9 Hz	3.71 ± 0.09	1,18 ± 0,13	1,31 ± 0,09	55,99 ± 5,87	49,62 ± 6,09
180 A – Pt_ct (AC)	8.51 ± 0.28	1,27 ± 0,12	0,85 ± 0,09	29,3 ± 4,00	39,79 ± 4,85
180 A – 3 Hz	8.02 ± 0.54	1,44 ± 0,04	1,13 ± 0,42	35,45 ± 4,31	44,22 ± 6,67
180 A – 6 Hz	7.91 ± 1.12	1,37 ± 0,06	0,80 ± 0,18	33,91 ± 6,77	37,93 ± 1,14
180 A – 9 Hz	7.75 ± 0.50	1,33 ± 0,05	0,69 ± 0,15	34,97 ± 4,63	37,12 ± 2,05
250 A – Pt_ct (AC)	12.48 ± 0.32	1,51 ± 0,07	0,87 ± 0,01	25,15 ± 5,52	37,88 ± 2,72
250 A – 3 Hz	10.85 ± 0.37	1,73 ± 0,05	1,40 ± 0,20	28,68 ± 3,70	46,75 ± 7,80
250 A – 6 Hz	10.94 ± 0.75	1,75 ± 0,08	1,34 ± 0,08	31,05 ± 3,07	45,67 ± 2,45
250 A – 9 Hz	11.41 ± 0.35	1,62 ± 0,05	1,06 ± 0,05	27,65 ± 0,92	41,13 ± 4,34

No que tange à penetração do cordão, os resultados mostram que para 110 A, o caso de AC em ponte constante apresentou menor penetração, e com a

alimentação dinâmica, aumentou com o incremento da frequência. Em 180 e 250 A penetração foi menor para a condição de AC, entretanto, o incremento da frequência em AD evidentemente diminuiu a penetração em ambas as correntes para os casos em AD. No caso de 250 A, a maior penetração para as frequências de 3 e 6 Hz também podem estar ligadas à ocorrência do *stutting*. Novamente, o “enterramento” do arame acaba agitando o fundo da poça aumento as trocas convectivas na linha de fusão próximo a região central. Observando o perfil de penetração para estas condições (Figura 137), nota-se a convexidade da penetração mais acentuadas na região central do cordão.

Figura 137 - Macrografias dos cordões da série de ensaios em 110, 180 e 250 A. Amostras do centro do cordão (corte BB da Figura 46). Linhas tracejadas representam as dimensões dos ensaios em 3 mm



Fonte: elaborado pelo autor.

Seguindo com os resultados macrográficos, os cordões realizados em 110 A apresentaram ângulos de molhamento muito maiores que as demais condições. Embora a relação Va/P tenha sido respeitada, o nível de menor energia apresentou cordões com geometria muito mais convexa que os demais visto o menor nível de energia, mostrado também pelo índice de convexidade. Entretanto, mesmo que o aumento da frequência tenha provocado maior ângulo de molhamento, o IC apresentou leve redução para os casos em AD. Já para os casos de 180 e 250 A, os ensaios com alimentação dinâmica apresentaram maiores ângulo de molhamento e índices de convexidade, em acordo com a variação apresentada pela largura e altura do cordão.

Por fim, os resultados da diluição mostram que em 110 e 250 A, os ensaios com alimentação dinâmica, embora mais convexas, apresentaram maiores médias.

Entretanto, em 250 A, nota-se claramente que o aumento da frequência tende a reduzir a diluição no cordão. Já para 180 A, na frequência de 3 Hz a diluição foi maior que para a condição em AC, visto a maior penetração, porém, em 6 e 9 Hz a diluição foi menor.

Um ponto a se destacar é que na condição de AC em 180 A, a potência do arco foi aproximadamente 7 % menor que os casos em AD. No entanto, contrariando a tendência natural, o cordão apresentou maior largura, menor reforço e menor ângulo de molhamento.

Pela análise de variância, a hipótese nula (H_0) não pode ser rejeitada em nenhuma das dimensões para a corrente de 110 A, isto é, não se pode afirmar que houve uma diferença significativa entre as médias. Os valores-p mostrados na Tabela 37 foram todos superiores à 0,05 na série de menor corrente de soldagem. Para os ensaios com 180 A, pode-se afirmar que houve uma diferença significativa entre as médias para as dimensões de reforço, penetração e diluição, entretanto, o mesmo não pode ser dito para a largura, ângulo de molhamento e índice de convexidade. Já para 250 A, com exceção do ângulo de molhamento, os valores-p mostram que houve diferença significativa entre as médias de todas as demais dimensões (Largura, reforço, penetração, diluição e índice de convexidade). Estes resultados mostram que a frequência de oscilação do arame tem maior influência em condições de maior energia, corroborando com os resultados obtidos por Riffel et al. [60], que obteve uma variação da geometria do cordão para a corrente de 250 A, comparada com 200 A. Vale ressaltar que o autor trabalhou com inserção radial do arame.

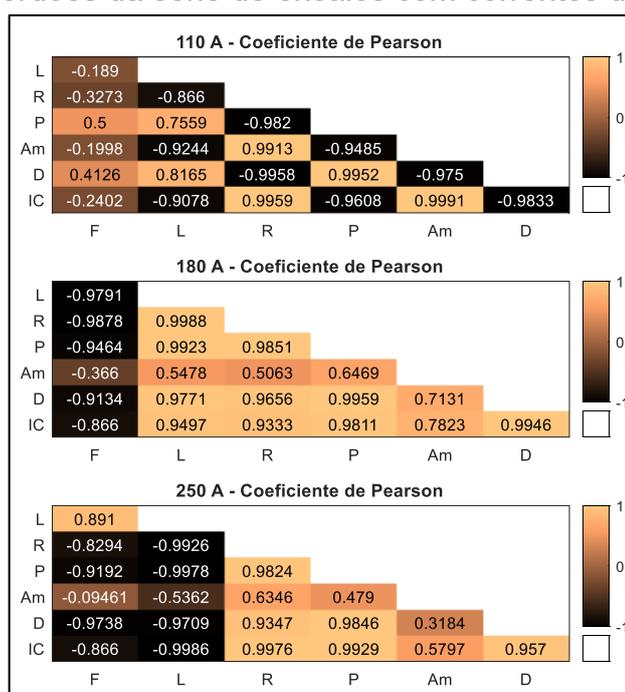
Tabela 37 – Valores de *p-value* referentes ao método ANOVA aplicado sobre os resultados geométricos da série com correntes de 110, 180 e 250 A considerando apenas a alimentação dinâmica.

	Freq.	L	R	P	Am	Dil.	IC
<i>p-value</i>	110 A	0,1227	0,5275	0,7113	0,4359	0,6097	0,3959
<i>p-value</i>	180 A	0,7129	0,0230	0,0149	0,7487	0,0097	0,4185
<i>p-value</i>	250 A	0,0286	0,0170	0,0267	0,3166	0,0181	0,0178

Assim como para a serie variando a amplitude, o teste de correlação de Pearson também fora aplicado. Os índices de correlação são mostrados na Figura 138. Para a corrente de 110 A, o índices mostram correlação moderada entre a frequência

de oscilação do arame com a penetração e diluição, enquanto para as demais dimensões a correlação é fraca. Resultado este que corrobora com a análise de variância, a qual não apontou diferença significativa entre as medições. Para os ensaios com corrente de 180 A, com exceção do ângulo de molhamento, os índices mostraram forte correlação de variação com a frequência de oscilação. Já para a corrente de 250 A, a variação de todas as dimensões tiveram forte correlação com a variação da penetração.

Figura 138 - Coeficientes de correlação de Pearson para frequência com valores geométricos dos cordões da série de ensaios com correntes de 110, 180 e 250 A;



Fonte: elaborado pelo autor.

5.3.5 Análise por termografia infravermelha

Dentre os trabalhos que abordam alimentação dinâmica de arame no processo TIG, apresentados na seção 3.3, apenas dois abordam uma análise sobre a temperatura da poça [9, 46]. Entretanto, os autores utilizaram alimentação com ângulo de alimentação elevado, caracterizando a inserção radial. Considerando a hipótese de que na técnica de inserção de topo ocorra o suposto efeito “*hot-wire*”, provocado pela passagem do arame por região mais quentes da coluna de arco e pela maior comprimento de arme no arco, o resfriamento da poça devido à menor temperatura

do arame, hipótese sugerida pelos autores citados, não seria tão expressivo. Assim sendo, pelo método indireto de medição termográfica, ensaios em dois níveis de corrente de soldagem foram avaliados para diferentes frequências de oscilação. Ademais, uma série variando a amplitude também foi performada. Por fim, para critério de comparação, foi realizada uma série de ensaios com inserção radial pela frente do arco.

A Tabela 38 mostra os valores médios de corrente, tensão do arco e potência para os ensaios realizado a 190 A variando a frequência de oscilação. Os resultados mostram que a condição de ponte contínua apresentou menor valor de potência média, assim como o resultado obtido nas seções 5.3.1 e 5.3.4. Neste caso, a potência média para a condição AC em ponte contínua foi de 2036 W, enquanto a maior média obtida foi para a condição de 12 Hz (2240 W). Entre as amostras em AD não houve diferença significativa entre os valores médios de potência.

Tabela 38 - Valores médios de Corrente (I_{ARC}), Tensão média (U_{ARC}) e Potência média (P_{ARC}) para ensaios com corrente de 190 A

Ensaio	I_{ARC} [A]	U_{ARC} [V]	P_{ARC} [W]
190_PTct	191 ± 2	10,6 ± 0,1	2036 ± 20
190_3Hz	191 ± 2	11,1 ± 0,2	2132 ± 29
190_6Hz	192 ± 2	11,1 ± 0,2	2125 ± 27
190_9Hz	190 ± 1	11,3 ± 0,2	2170 ± 30
190_12Hz	192 ± 2	11,5 ± 0,3	2240 ± 30
190_15Hz	191 ± 1	11,2 ± 0,2	2150 ± 29
190_18Hz	192 ± 1	11,4 ± 0,3	2170 ± 35

A Figura 139 mostra os resultados obtidos para os ensaios com inserção de topo em 115 e 190 A. Para a condição de maior nível energético, o gráfico de temperaturas médias e máximas (superior à direita), mostra que a condição de alimentação convencional apresentou a menor temperatura média e máxima na área circular destacada. Embora a diferença na temperatura medida seja pequena, aprox. 70 °C, esta pode estar associada à menor potência média, conforme mostrado na Tabela 38. Entretanto, a condição de maior potência (12 Hz), não foi o ensaio que apresentou maior valor de temperatura medido no verso da chapa, ainda que para as

condições de AD a temperatura média mostrou tendência em aumentar com o aumento da frequência de oscilação do arame, indo em outra direção que os resultados obtidos por Paes [7] e Riffel [9], os quais apresentaram uma redução na temperatura no verso da chapa para as condições de AD.

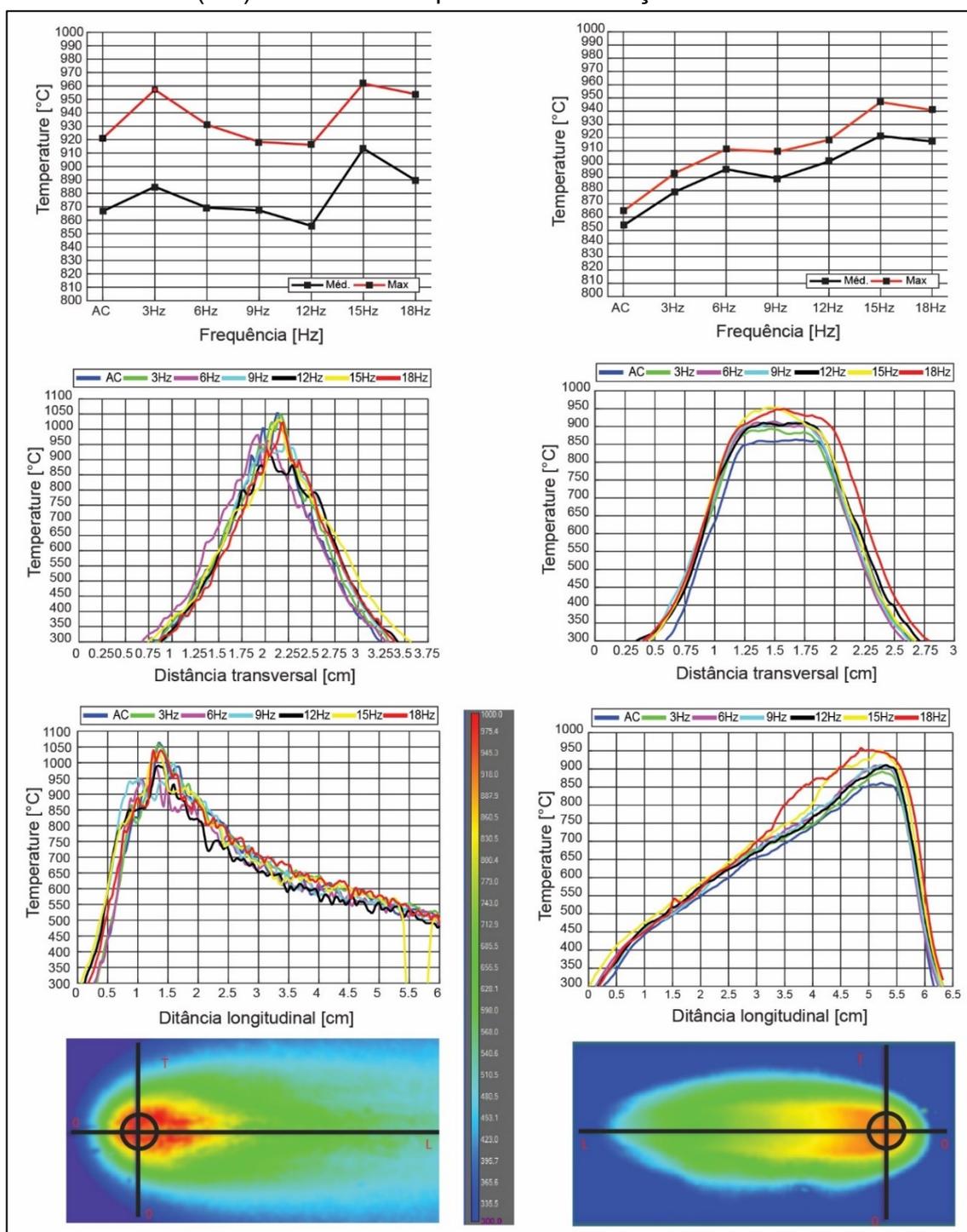
Pelos gráficos que representam o perfil transversal da poça, é possível notar que a largura da curva de valores de temperatura medidos é maior para as condições em AD, e aumenta com a frequência. Entretanto, conforme já fora apresentado, o aumento da frequência leva a uma redução da largura do cordão, o que induziria a uma menor largura da curva de temperatura. Além disso, frequências mais altas levam a uma menor penetração, o que também levaria a crer que menores temperaturas pudessem ser observadas. Uma vez que a temperatura medida no verso da chapa aumentou, e considerando que não houve diferenças significativas entre a potência do arco, sugere-se aqui uma outra hipótese para justificar medições de temperatura mais altas para as condições de AD. Neste caso, o principal fator estaria associado ao aumento do coeficiente de convecção entre a poça de fusão e a peça devido a agitação forçada provocada pela oscilação do arame. Além disso, a agitação tende a homogeneizar a temperatura da poça, reduzindo o gradiente de temperatura entre superfície e o fundo da poça, ou seja, a temperatura no fundo acaba sendo maior, enquanto na superfície, menor. Considerando estes dois fatores, pela equação de resfriamento de Newton dada por:

$$Q = h \times A \times (T_{poça} - T_{peça}) \quad (30)$$

onde Q é taxa de transferência de calor (W), h é o coeficiente de convecção (W/m².K), A é a área de contato entre a poça e a peça (m²), e T é a temperatura das partes (K), pode-se dizer que a taxa de transferência de calor é maior para os ensaios em AD, visto que tanto h quanto o ΔT é maior. Isso significa que a maior temperatura medida para as condições de maior frequência de oscilação advém de uma troca de calor mais eficiente entre a poça e peça e não de uma poça de fusão mais quente. A troca de calor mais eficiente induz a uma maior taxa de resfriamento da poça, e a microestrutura resultante para os ensaios com alimentação dinâmica mostradas na seção 5.3.1, corroboram com esta hipótese, visto que uma maior taxa de resfriamento promove o refino de grãos. Esta hipótese deve ser associada também ao suposto “efeito *hot-wire*” da inserção de topo. O resfriamento do arame quando este encontra-

se afastado do arco, é mitigado pelo “pré-aquecimento” do arame que percorre regiões mais quente do arco e, ao estabelecer a ponte metálica, absorve menos calor da poça metálica, o que levaria a uma maior temperatura da poça.

Figura 139 – Termografia para ensaios com inserção de topo em 115 A (esq.) e 190 A (dir.) variando a frequência de oscilação do arame.

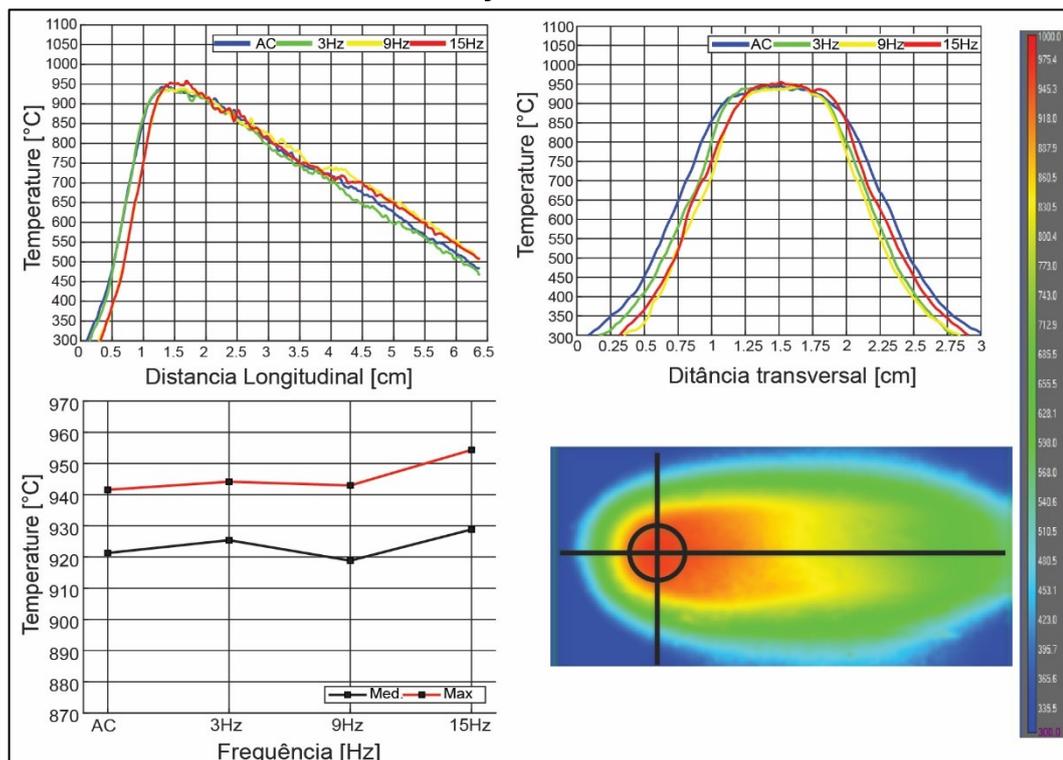


Fonte: elaborado pelo autor.

Para a condição de 115 A, os resultados obtidos não foram tão evidentes como para 190 A. Para o menor nível de energia, o sinal de temperatura apresentou-se mais ruidoso, o que pode ser justificado pelo menor gradiente de temperatura entre a superfície da poça e o verso da chapa (menor ΔT). Entretanto, a pouca diferença entre as temperaturas médias e máximas, bem como o perfil transversal e longitudinal desta série de ensaios, corroboram com os resultados geométricos apresentados para o nível de 110 A da série anterior, os quais também não apresentaram variações significativas.

Além da condição de inserção de topo, um serie de ensaios foi realizada com inserção de topo pela frente do arco e os resultados obtidos, apresentados na Figura 140, corroboram parcialmente com os presentes na literatura. Os gráficos mostram que não houve uma variação significativa nas temperaturas e, para a condição de alimentação convencional em ponte contínua, a temperatura média não foi superior que para alimentação dinâmica, diferente do que apresentou Riffel [9]. O autor mostra que no caso de AD, a temperatura máxima atingida foi de 200 °C maior que para a condição AC. Nos resultados apresentados na Figura 140, essa diferença não passou de 25 °C. Ademais, nota-se uma maior largura da poça para as condições AC. Já no trabalho apresentado por Paes [7], a diferença de temperatura entre AC e AD em 1 Hz foi de 20 °C, e de 28°C para 2 Hz, sendo menores para a condição AD.

Figura 140 – Termografia para inserção de topo em 190 A variando a frequência de oscilação do arame.



Fonte: elaborado pelo autor.

A pequena variação da temperatura entre as amostras não mostrou uma diferença significativa e a hipótese de que a oscilação de arame aumenta a troca de calor entre a poça e a peça, não pode ser confirmada. Entretanto, o não aumento da temperatura da chapa faz sentido se associar com a hipótese de que para a condição radial de fato o arame absorva mais energia da poça para fusão, reduzindo sua temperatura, de forma que uma hipótese compensa a outra, isto é, a temperatura da poça pode ser menor, mas a troca de calor mais eficiente levaria a uma temperatura maior observada no verso da chapa.

Os resultados apresentados sugerem que investigações mais aprofundadas quanto ao balanço de massa e energia do processo devam ser realizadas para melhor compreender os efeitos termodinâmicos que a alimentação dinâmica induz sobre a poça de fusão. Para tanto, faz-se necessário o uso de técnicas mais acuradas para medição de temperatura da poça bem como modelos que melhor atendam os mecanismos de transferência de calor.

5.3.6 Variação da posição relativa de alimentação (Frontal, Lateral e Traseira)

Embora alguns autores enfatizem que a inserção de topo apresente uma menor distorção geométrica do cordão de solda para diferentes condições da posição de inserção do arame, isto é, em procedimentos omnidirecionais, os resultados encontrados na literatura, apresentados na seção 3.2.2, não são plenamente convincentes. Assim sendo, esta série de ensaios fora realizada para complementar a literatura técnica e os resultados obtidos não corroboram o que alguns autores afirmam sobre a baixa variação da geometria do cordão de acordo com a posição de inserção do arame.

A Tabela 39 mostra os valores médios de corrente, tensão do arco e potência, bem como a velocidade de arame média para cada condição ensaiada. Conforme pode ser visto, a potência do arco foi menor para a condição de alimentação pela frente do arco em ponte contínua. Entretanto, para que fosse configurada a alimentação em ponte contínua na condição de alimentação pela frente, houve a necessidade de se reduzir o comprimento do arco, o que resultou numa menor tensão. Já para as condições de alimentação dinâmica não houve variações significativas, exceto para 9 Hz lateral, que apresentou uma menor potência do arco.

Tabela 39 – Valores médios de corrente, tensão do arco, potência e velocidade de arame para os ensaios variando a posição de inserção do arame. F=Frontal; L=Lateral e T=Traseira.

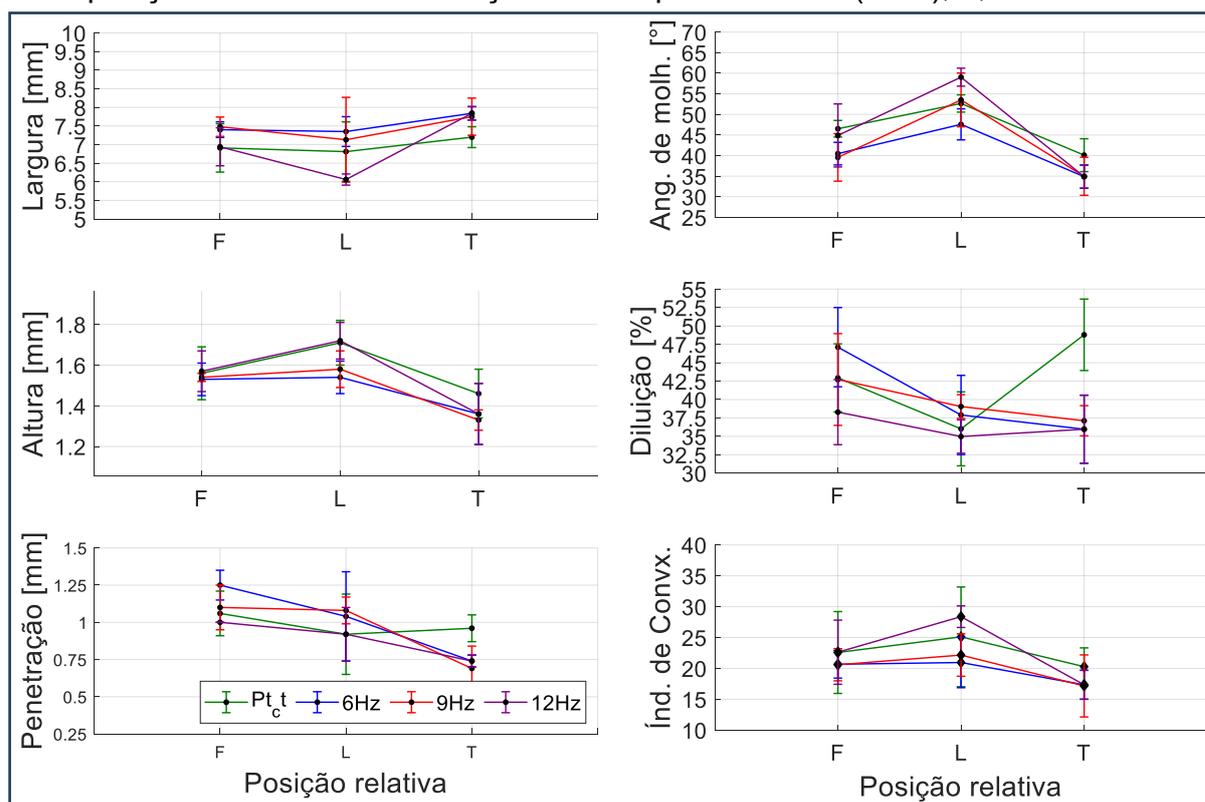
Ensaio	I _{ARC} [A]	U _{ARC} [V]	P _{ARC}	VA _{MED} [m/min]
Pt_ct F	180 ± 2	9,6 ± 0,2	1763 ± 44	1,5 ± 0,6
Pt_ct L	179 ± 2	10,2 ± 0,3	1820 ± 50	1,5 ± 0,5
Pt_ct T	179 ± 2	10,1 ± 0,2	1812 ± 61	1,5 ± 0,5
6 Hz F	180 ± 2	10,4 ± 0,7	1828 ± 121	1,5 ± 9,3
6 Hz L	179 ± 2	10,4 ± 0,5	1866 ± 89	1,5 ± 7,3
6 Hz T	179 ± 2	10,2 ± 0,5	1817 ± 93	1,5 ± 7,2
9 Hz F	179 ± 1	10,4 ± 0,7	1873 ± 132	1,5 ± 12,3
9 Hz L	180 ± 2	10,0 ± 0,4	1775 ± 77	1,5 ± 11,3
9 Hz T	179 ± 1	10,3 ± 0,6	1837 ± 11	1,5 ± 12,2
12 Hz F	179 ± 1	10,5 ± 0,8	1877 ± 139	1,5 ± 17,2
12 Hz L	179 ± 2	10,3 ± 0,4	1826 ± 79	1,5 ± 16,8
12 Hz T	179 ± 1	10,5 ± 0,5	1877 ± 82	1,5 ± 17,0

Embora não houvesse variações significativas nos valores médios de potência, este resultado não refletiu numa homogeneidade geométrica entre as diferentes posições de alimentação. Os valores geométricos para cada condição ensaiada são mostrados na Tabela 40 e nos gráficos da Figura 141. Já a Figura 142 mostra a seção transversal dos cordões.

Tabela 40 – Valores geométricos medidos para os ensaios realizados em diferentes posições de inserção do arame.

Ensaio	L [mm]	R [mm]	P [mm]	Am [°]	Dil.[%]	IC
Pt_ct F	6,96 ± 0,65	1,56 ± 0,13	1,06 ± 0,15	46,52 ± 2,02	42,94 ± 5,16	0,22
Pt_ct L	6,91 ± 0,80	1,71 ± 0,11	0,86 ± 0,27	52,66 ± 2,10	36,02 ± 5,05	0,25
Pt_ct T	7,00 ± 0,28	1,46 ± 0,12	1,36 ± 0,09	40,10 ± 4,00	48,79 ± 4,85	0,21
6 Hz F	7,40 ± 0,21	1,53 ± 0,06	1,25 ± 0,10	40,47 ± 2,74	37,93 ± 5,38	0,21
6 Hz L	7,35 ± 0,40	1,54 ± 0,08	1,04 ± 0,30	47,59 ± 3,77	37,90 ± 5,48	0,21
6 Hz T	7,91 ± 0,32	1,37 ± 0,08	0,78 ± 0,18	33,91 ± 6,77	47,11 ± 2,14	0,17
9 Hz F	7,48 ± 0,46	1,54 ± 0,15	1,10 ± 0,15	39,56 ± 5,78	42,72 ± 6,23	0,21
9 Hz L	7,13 ± 0,34	1,58 ± 0,09	1,08 ± 0,09	53,52 ± 6,53	39,05 ± 1,61	0,22
9 Hz T	7,75 ± 0,26	1,33 ± 0,05	0,69 ± 0,15	34,97 ± 4,63	37,12 ± 2,05	0,17
12 Hz F	6,94 ± 0,18	1,57 ± 0,10	1,00 ± 0,35	44,89 ± 7,66	38,29 ± 5,24	0,23
12 Hz L	6,06 ± 0,15	1,72 ± 0,09	0,92 ± 0,92	59,05 ± 3,18	34,98 ± 2,27	0,28
12 Hz T	7,84 ± 0,51	1,36 ± 0,15	0,74 ± 0,12	34,88 ± 3,81	35,97 ± 4,62	0,17

Figura 141 - Gráficos da variação geométrica dos cordões para a série variando a posição relativa de alimentação nas frequências de 0 (Pt-ct), 6, 9 e 12 Hz.

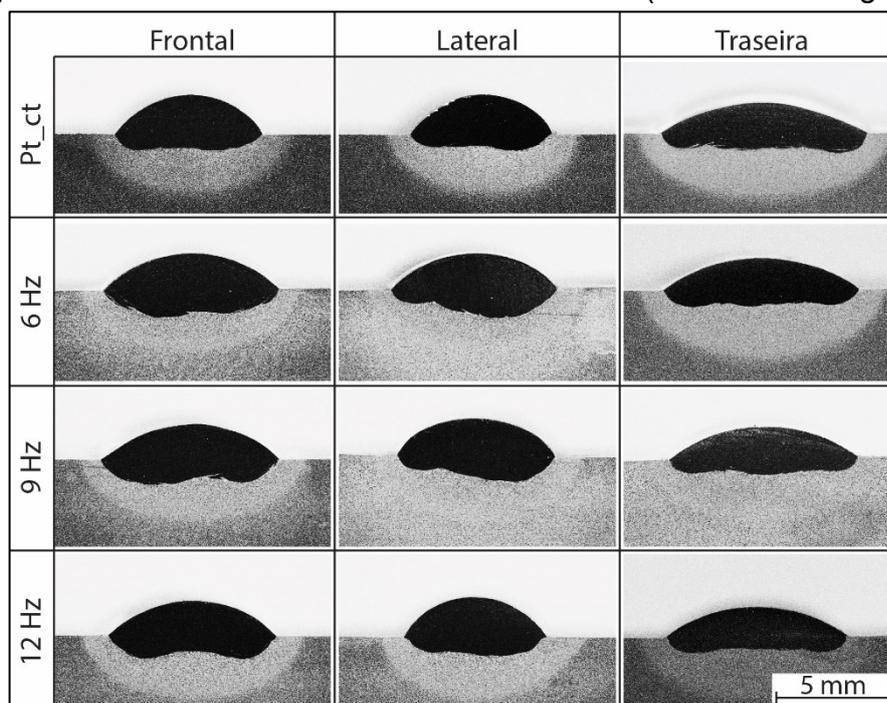


Fonte: elaborado pelo autor.

Quanto a largura do cordão, nota-se que a alimentação por traz apresentou uma maior largura do cordão em todas as condições. Para as frequências de 9 e 12 Hz, a alimentação lateral apresentou menor largura, enquanto para ponte contínua e 6 Hz, esta dimensão foi menor na condição de alimentação frontal. Quanto à altura do cordão, em todas as condições a posição que apresentou maior reforço foi a alimentação lateral, enquanto a alimentação por traz foi menor, também em todas as condições. Embora na condição lateral a frontal para a frequência de 6 Hz não houvesse o recuo em ponte, conforme mostra o gráfico da Figura 143, ainda assim o reforço do cordão foi maior do que para a alimentação por trás. Para as outras frequências, embora houvesse recuo em ponte em todas as posições e que este tenha sido maior para a alimentação por trás, ainda assim a altura do cordão foi menor nessa posição. No que tange à penetração do cordão, a alimentação por traz apresentou menores valores para os ensaios em AD, enquanto na alimentação em ponte contínua, o ensaio com alimentação lateral apresentou menor penetração. Pelas macrografias mostradas na Figura 142, nota-se que a penetração do cordão fora deslocada para o lado de inserção do arame quando alimentado pela lateral, apresentando um perfil assimétrico em todas as condições.

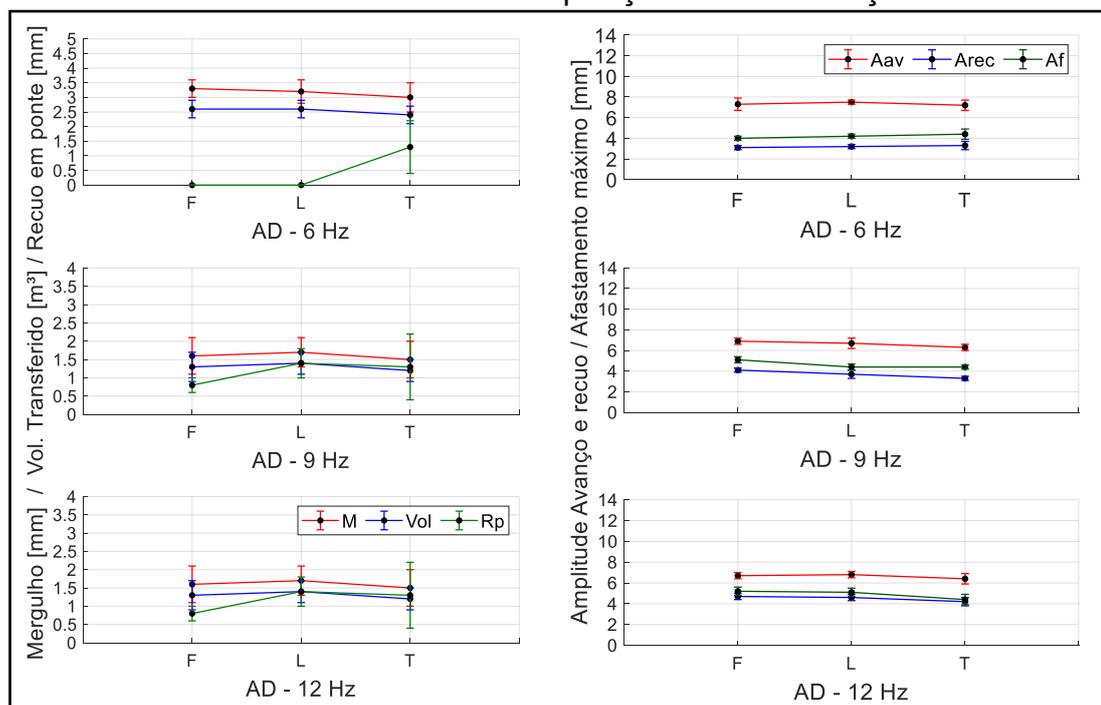
A maior altura do cordão para a condição de alimentação lateral levou a um maior ângulo de molhamento, o que, por sua vez, levou a maiores índices de convexidade. A condição que apresentou menor ângulo de molhamento foi a alimentação por trás. Já para diluição, os ensaios com alimentação dinâmica apresentaram menor diluição na alimentação por trás, entretanto, para a condição de ponte contínua, esta posição foi a que apresentou maior valor de diluição.

Figura 142 - Macrografias dos cordões da série de ensaios variando a posição de inserção do arame. Amostras do centro do cordão (corte BB da Figura 46).



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 143 – Variação do mergulho do arame, recuo e ponte e volume transferido (esq.) e amplitude de avanço / recuo e afastamento máximo (dir.) para os ensaios realizados em diferentes posições de alimentação.



Fonte: elaborado pelo autor.

Assim como para as series anteriores, a análise de variância mostrou que houve uma diferença significativa entre as médias em praticamente todas as geometrias nas condições de alimentação dinâmica, com exceção para a largura do cordão em 6 e 9Hz, e diluição para 12 Hz. Na condição de ponte contínua, houve uma diferença significativa apenas para a largura e ângulo de molhamento. Para as demais geometrias não é possível afirmar que houve variação entre as médias. O valores-p que permitem estas afirmações são mostrados na Tabela 41.

Tabela 41 – Valores de *p-value* referentes ao método ANOVA aplicado sobre os resultados geométricos da série variando a posição de inserção do arame.

	Freq.	L	R	P	Am	Dil.	IC
<i>p-value</i>	Pt_ct	0,0197	0,8939	0,6837	0,0127	0,5382	0,1892
<i>p-value</i>	6 Hz	0,1747	0,0030	0,0063	0,0012	0,0037	0,0197
<i>p-value</i>	9 Hz	0,1861	0,0001	0,0005	0,0193	0,0318	0,0011
<i>p-value</i>	12 Hz	0,0001	0,0011	0,0031	0,0002	0,2112	0,0001

Os resultados apresentados mostram que, embora a execução do cordão seja possível em todas as posições de inserção de arame, caracterizando um processo omnidirecional, as variações geométricas não sugerem o grau de coaxialidade, conforme apresentado por Rodriguez et al. [48]. A variação da geometria do cordão é nítida, conforme mostra Figura 142, e confirmada pela análise de variância.

Uma outra análise proposta neste trabalho refere-se ao índice de simetria dos cordões. Conforme mencionado na seção 5.3.6, foram avaliadas as simetrias de área fundida e área penetrada a partir do índice de simetria calculado. A Tabela 42 mostra os valores dos índices encontrados para as diferentes posições de inserção e arame.

Tabela 42 – Índices de simetria de área fundida e área penetrada

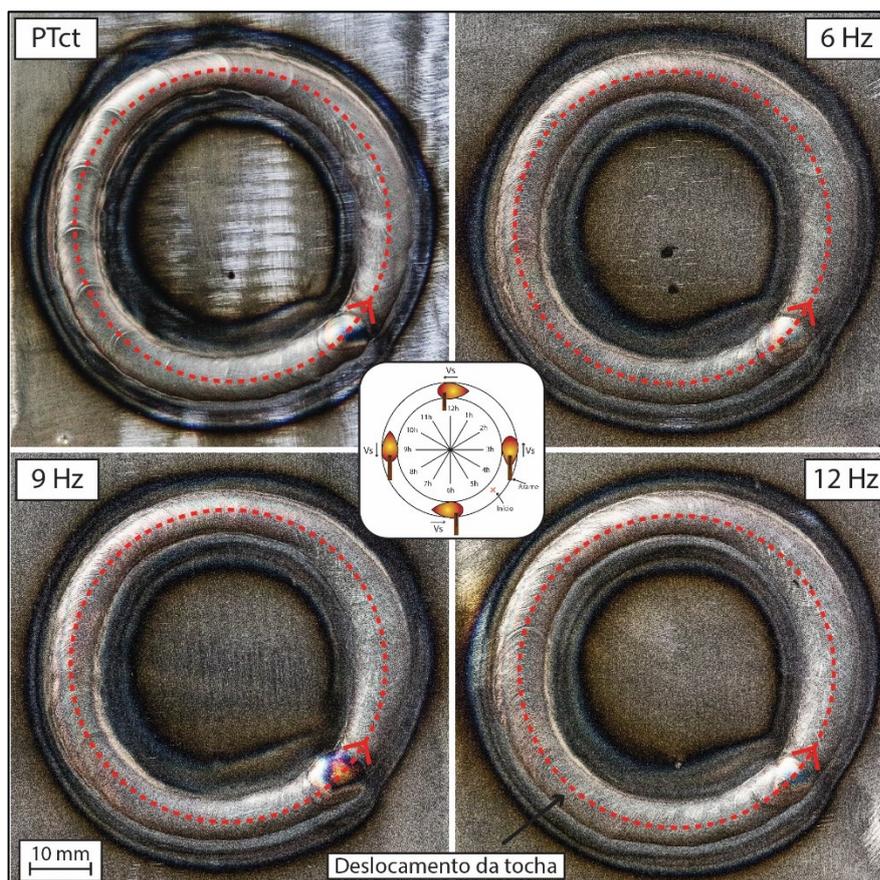
Índice	Ensaio	Frontal	Lateral	Traseira
Área penetrada	Pt_ct	0,85	0,87	0,90
	3 Hz	0,93	0,70	0,94
	6 Hz	0,85	0,74	0,92
	9 Hz	0,97	0,91	0,98
Área fundida	Pt_ct	0,99	0,93	1,00
	3 Hz	0,94	0,85	0,97
	6 Hz	0,98	0,89	0,97
	9 Hz	0,98	0,99	0,98

Conforme pode ser visto, o índice de simetria para área penetrada apresentou grandes variações com a posição de inserção, sendo menor para a inserção lateral. Já a inserção por trás apresentou o melhor índice, o que também pode ser observado visualmente pelas macrografias da Figura 142. Ademais, nota-se que a maior frequência de oscilação (9 Hz) resultou numa melhor simetria da área fundida para todas as posições. No que tange o índice para toda a área fundida, nota-se que a variação foi bem menor quando comparada com o índice de área penetrada. Para este índice, a alimentação por trás também mostrou valores de simetria maiores que as demais posições.

Além dos ensaios tipo *bead on plate*, foram realizados ensaios com deslocamento circular com alimentação omnidirecional, isto é, a posição de inserção de arame variava à medida que o cordão fosse executado. Nestes ensaios, apenas os valores de altura e largura do cordão foram considerados.

A Figura 144 mostra o aspecto de cada cordão realizado. A linha tracejada em vermelho indica a trajetória do eletrodo. Assim como os resultados apresentados no início da seção, para os ensaios circulares a variação da geometria também é bastante acentuada, sobretudo na posição de alimentação por trás.

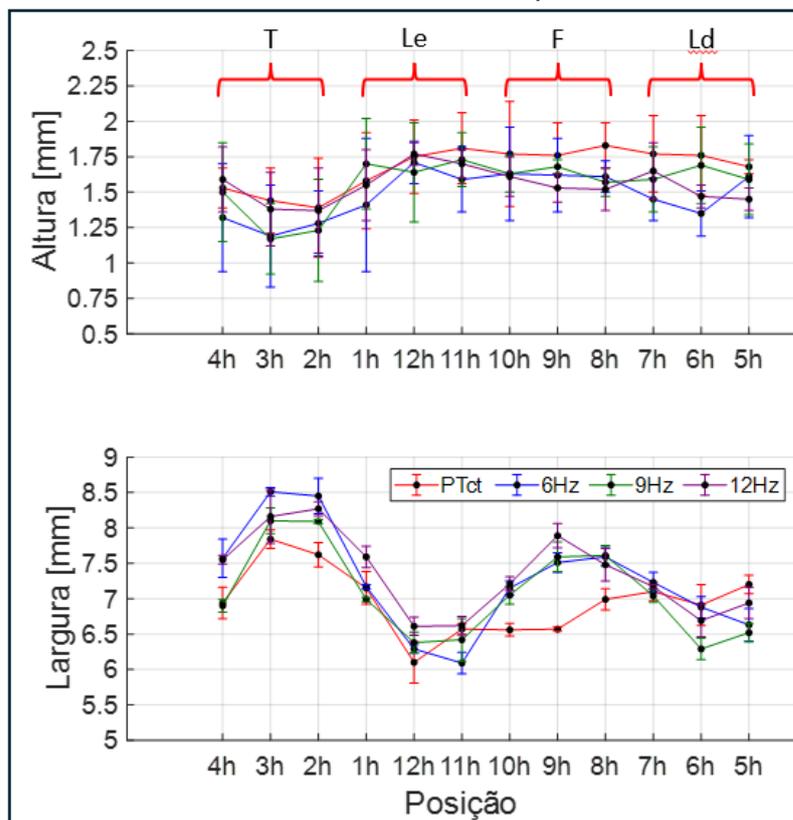
Figura 144 – Aspecto dos cordões de solda circulares com alimentação omnidirecional.



Fonte: elaborado pelo autor.

A Figura 145 mostra os valores médios obtidos pela medição com paquímetro da altura e largura do cordão nas diferentes regiões do cordão. Vale ressaltar que as regiões são destacadas de acordo com a posição de um ponteiro de relógio. Conforme pode ser visto, o perfil geométrico varia de acordo com a posição relativa, sendo que a altura do cordão foi menor para a posição de alimentação por trás em todas as condições. Já a largura fora menor nas posições de alimentação lateral. É interessante notar também que a condição de alimentação em ponte contínua apresentou uma menor diferença entre as posições, enquanto os casos de AD as variações geométricas foram mais acentuadas, sobretudo na largura do cordão.

Figura 145 – Valores médios de altura e largura do cordão nas diferentes regiões do cordão. T = trás; F=frente; Le = Lateral esquerda; Ld=lateral direita.



* o início do cordão se deu na posição relativa à 4h30min.

Fonte: elaborado pelo autor.

Os resultados apresentados mostram que, embora a soldagem omnidirecional seja possível de ser executada com a inserção de topo, é necessária uma parametrização adaptativa, isto é, uma parametrização que se altere de acordo com a posição de inserção do arame. Dessa forma, as variações geométricas podem reduzidas ou mitigadas quando parametrizações que levem à perfis de cordões próximos sejam reguladas. Entretanto, uma boa base de dados experimentais se faz necessária para que os parâmetros possam ser regulados corretamente.

5.3.7 Sincronismo da corrente pulsada e alimentação dinâmica

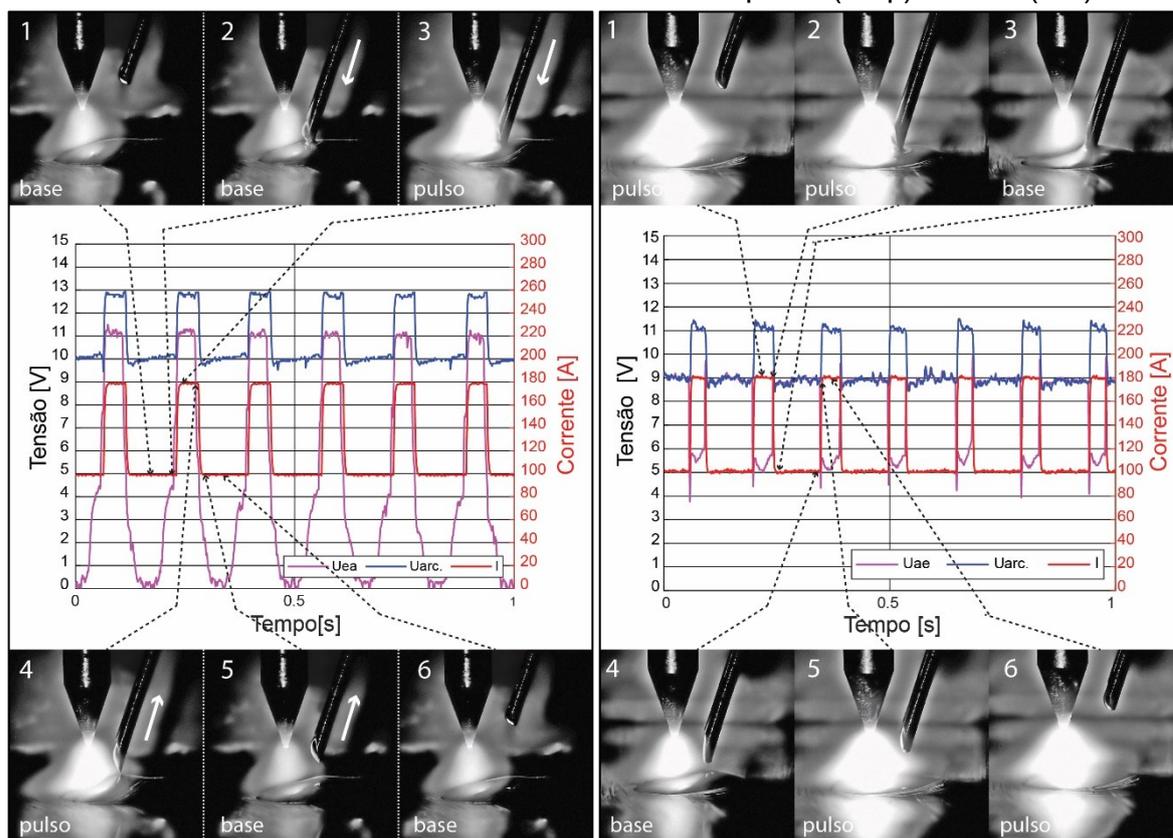
Conforme comentado na seção 4.9.7, durante o desenvolvimento do trabalho levantou-se a hipótese de que a sincronização da corrente de soldagem com a alimentação dinâmica de arame pudesse favorecer a redução da diluição do cordão

de solda. Neste caso, a sincronia foi feita de acordo com as condições em ponte metálica ou ponte destacada com períodos de pulso e base de corrente de soldagem. Para esta série, os ensaios serão referenciados como sincronizados no pulso (s-pulso), isto é, o período de pulso de corrente ocorre durante o período em ponte; e sincronizado na base (s-base), onde o período de base de corrente ocorre durante o período em ponte. Além desses, foram realizados ensaios em corrente constante a partir da corrente média dos ensaios sincronizados no pulso e ensaios de soldagem com corrente pulsada e alimentação dinâmica não sincronizados.

A Figura 146 mostra os oscilogramas de tensão e corrente associados aos quadros da filmagem em alta velocidade para os ensaios sincronizados no pulso e na base na frequência de 6 Hz. Para o primeiro caso, à esquerda da Figura 146, é possível notar que enquanto o arame encontra-se destacado, a corrente de soldagem permanece no patamar de base. Assim que a ponte metálica é estabelecida (Quadro 2), U_{AE} sobe e, a partir da tensão de referência regulada (descrita na seção 4.9.7), o MVS envia um sinal para fonte de soldagem que altera o parâmetro de soldagem para a corrente de pulso, a qual perdura até que a ponte metálica seja rompida (Quadro 5), retornando assim para os parâmetros de base.

Já para o ensaio sincronizado na base (oscilograma à direita), nota-se que este mesmo mecanismo de sincronismo ocorreu de maneira invertida. No momento que a ponte metálica se estabelece (quadro 2), a fonte altera os parâmetros, a partir do sinal enviado pelo MVS, para a corrente de base, a qual perdura até a ruptura da ponte metálica (Quadro 4).

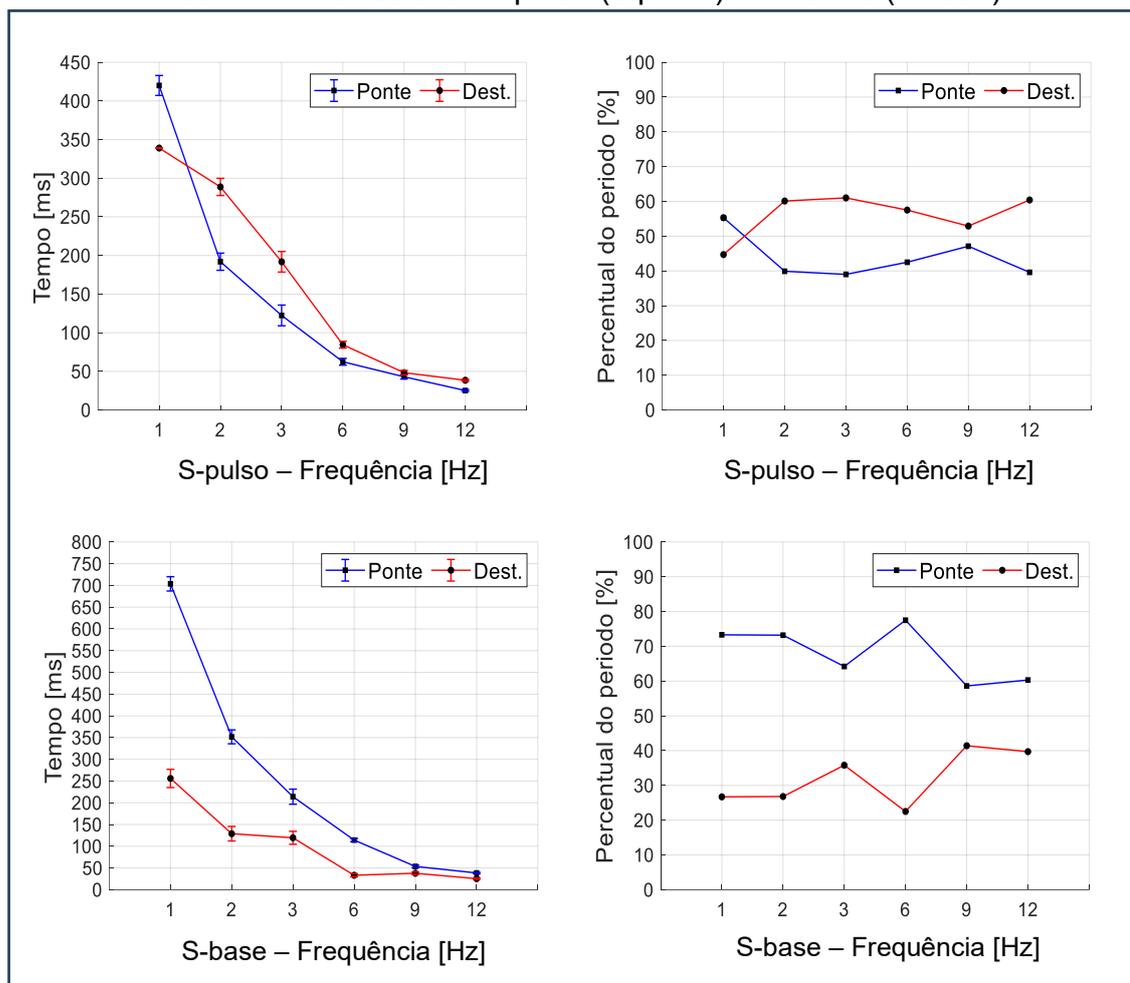
Figura 146 – Oscilograma de tensão e corrente com frames de filmagem para ensaios com AD e corrente sincronizados no pulso (esq.) e base (dir.)



Fonte: elaborado pelo autor.

Nos oscilogramas apresentados acima, nitidamente pode-se observar que os períodos em ponte são bastante distintos entre as duas condições, sendo que para a condição s-pulso, a ponte metálica tem um período mais curto que para s-base. Para o caso de 6 Hz, estes períodos foram, em média, 62 ms para o sincronismo no pulso e 114 ms para a base. Visto que as velocidades de avanço e recuo do arame são as mesmas para as duas condições, para o caso de s-pulso, a taxa de fusão durante o período em ponte é maior (ponte metálica ocorre durante o pulso de corrente), logo a ruptura da ponte metálica ocorre bem antes que no caso de s-base. A Figura 147 mostra os a variação dos tempos em ponte e ponte destacada para as condições de s-pulso e s-base. Conforme pode ser visto, apenas na frequência de 1 Hz em s-pulso o tempo em ponte foi maior que o tempo em ponte destacado. Conforme comentado em seções anteriores, em frequências muito baixas, a amplitude de avanço é elevada, favorecendo o estabelecimento da ponte metálica. Para o sincronismo na base, em todas as frequências o tempo em ponte foi superior ao destacado.

Figura 147 – Tempos em ponte e destacado e percentuais do período para os ensaios sincronizados no pulso (s-pulso) e na base (s-base).



Fonte: elaborado pelo autor.

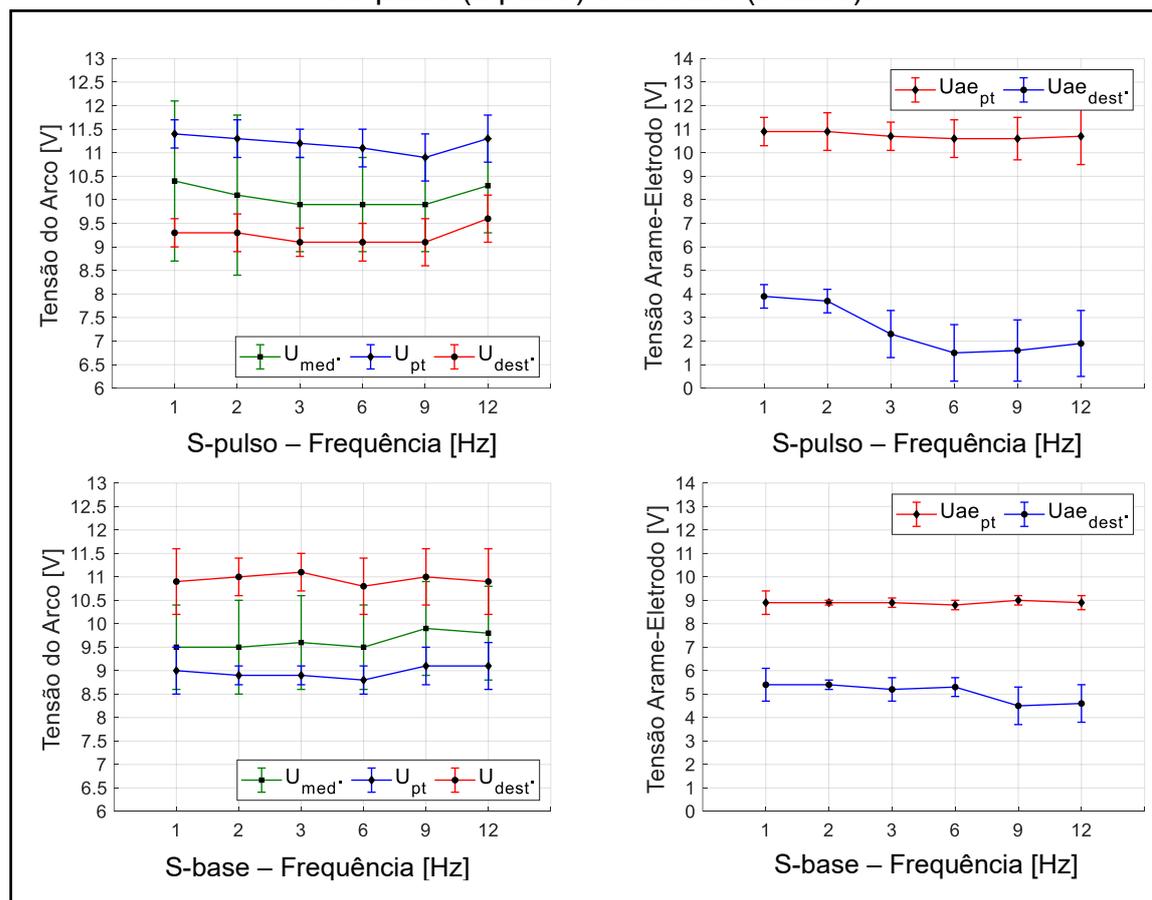
A diferença dos períodos em ponte e ponte destacada para as condições s-pulso e s-base acabaram por sua vez influenciando nos valores médios de corrente, tensão e potência do arco. Conforme mostra a Tabela 43, a série sincronizada no pulso apresentou uma maior corrente média. Embora o tempo em ponte tenha sido menor na maioria das condições, a diferença entre os percentuais em ponte e ponte destacada foram menores que para o caso de sincronismo na base (Figura 147). Isso, por sua vez, acabou resultando em uma corrente média maior para a condição s-pulso. Além da corrente, a potência média também foi maior, com exceção das frequências de 6 e 9 Hz onde as potências médias foram próximas entre as duas condições de sincronismo.

Tabela 43 – valores médios de corrente, tensão e potência do arco para a séries sincronizadas no pulso e na base.

Série	Frequência	I_{ARC} [A]	U_{ARC} [V]	P_{ARC} [W]
S-PULSO	1 Hz	145 ± 39	10,4 ± 1,7	1552
	2 Hz	134 ± 38	10,1 ± 1,7	1385
	3 Hz	132 ± 38	9,9 ± 1,0	1350
	6 Hz	135 ± 38	9,9 ± 1,0	1383
	9 Hz	138 ± 39	9,9 ± 1,0	1414
	12 Hz	132 ± 37	10,3 ± 1,0	1399
S-BASE	1 Hz	120 ± 34	9,5 ± 0,9	1172
	2 Hz	122 ± 34	9,5 ± 1,0	1184
	3 Hz	126 ± 36	9,6 ± 1,0	1253
	6 Hz	118 ± 35	9,2 ± 0,9	1118
	9 Hz	133 ± 36	9,9 ± 1,0	1365
	12 Hz	132 ± 34	9,8 ± 1,0	1342

Com relação à tensão média do arco, é interessante notar que uma vez que os períodos de pulso e base foram invertidos para as condições de sincronismo, no caso de s-pulso, a tensão do arco em ponte acabou sendo superior que a tensão em ponte destacada, diferindo dos resultados anteriores, onde a tensão em ponte sempre fora inferior à tensão em ponte destacada. Este resultado advém do fato de que na condição s-pulso, a ponte metálica ocorre durante o pulso de corrente, ou seja, durante o período em que a tensão do arco é maior. A Figura 148 mostra os valores de tensão do arco e tensão arame-eletrodo nas condições de ponte metálica e ponte destacada. É interessante notar também que a U_{AE} se comporta diferente dos resultados obtidos nas series anteriores. Para o caso de s-base, a tensão arame-eletrodo não cai para valores muito baixos quando este encontra-se afastado da poça, pois nesta condição a corrente está na fase de pulso.

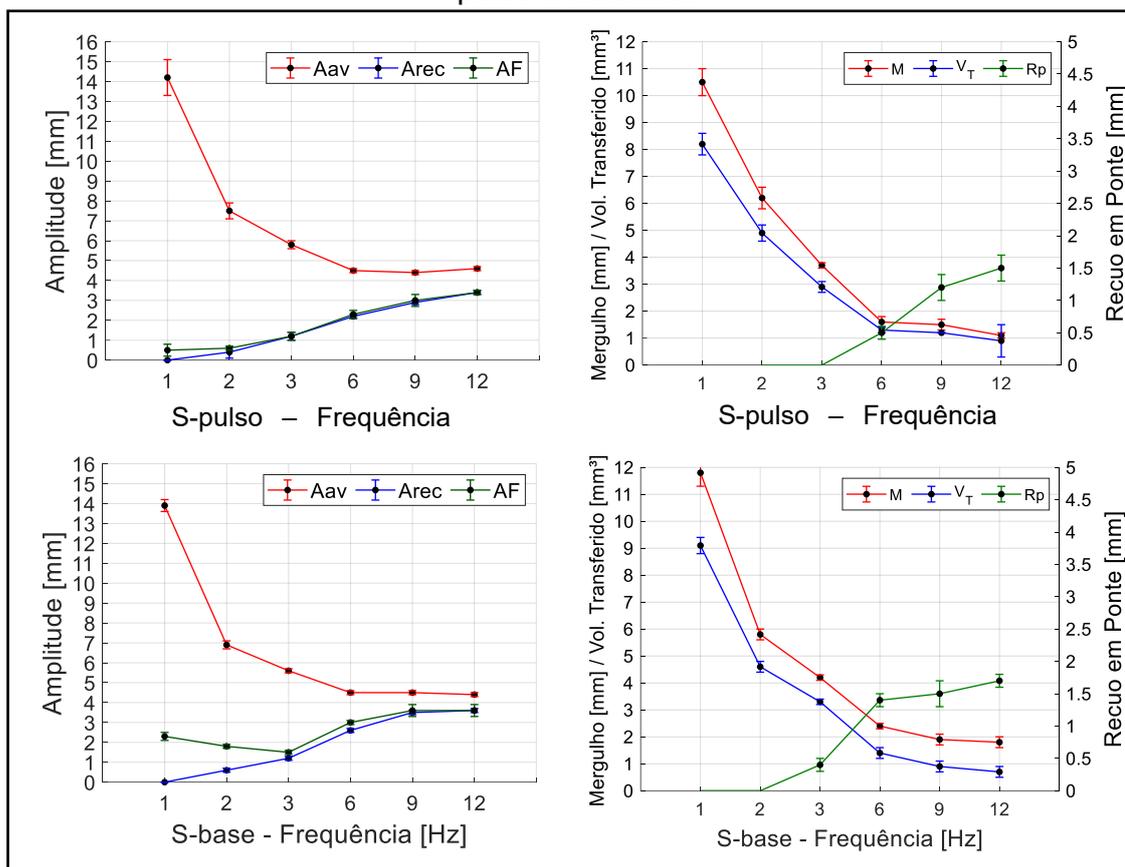
Figura 148 – Tensão do arco e tensão arame-eletrodo para os ensaios sincronizados no pulso (s-pulso) e na base (s-base).



Fonte: elaborado pelo autor.

Conforme já comentado, as amplitudes de oscilação reguladas foram iguais para as duas condições de sincronismo, o que pode ser observado nos gráficos da Figura 149. Entretanto, dada as diferentes fases da corrente durante a ponte metálica entre as séries sincronizadas, nota-se que o mergulho do arame, bem como o volume transferido, foi maior para a condição s-base. Isto se deve fundamentalmente pela menor capacidade de fusão do arco durante o período em ponte metálica que corre durante a fase de base da corrente.

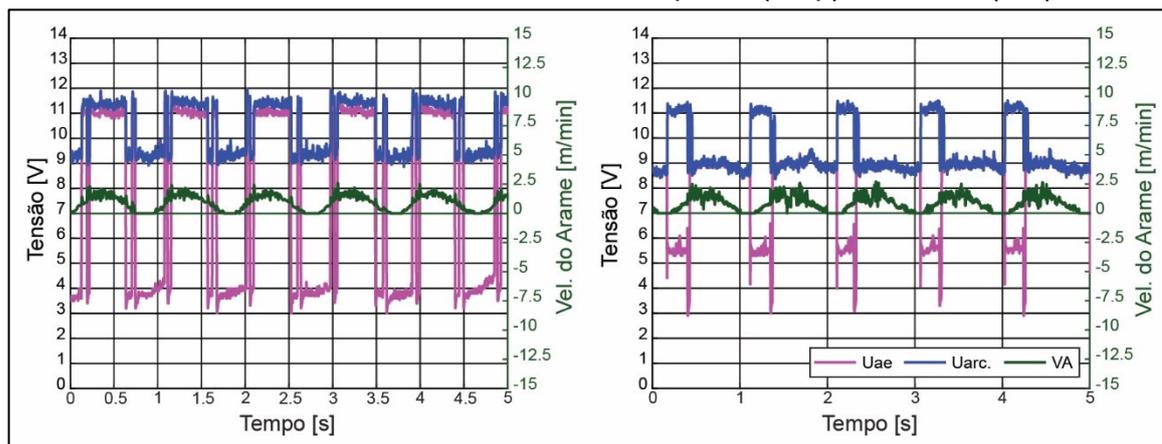
Figura 149 - Amplitude de avanço / recuo e afastamento máximo (esq.) e mergulho do arame, recuo e ponte e volume transferido (dir.) para ensaios sincronizados no pulso e na base.



Fonte: elaborado pelo autor.

Já para o recuo em ponte, na frequência de 1 e 2 Hz, nenhuma das condições de sincronismo apresentou recuo do arame, nem mesmo em ponte destacada. Isso porque a baixa velocidade favorece a fusão do arame, promovendo a ruptura da ponte metálica antes mesmo do arame parar por completo. Isto pode ser observado nos oscilogramas de tensão e VA mostrados na Figura 150. Note que a ponte metálica se rompe (caracterizada pela queda de U_{AE}) ainda na fase de avanço durante a desaceleração do arame. Também é possível notar que ocorrem destacamentos de gotas antes do estabelecimento da ponte metálica e na condição s-pulso, alguns destacamentos ocorrem também após o período de pulso.

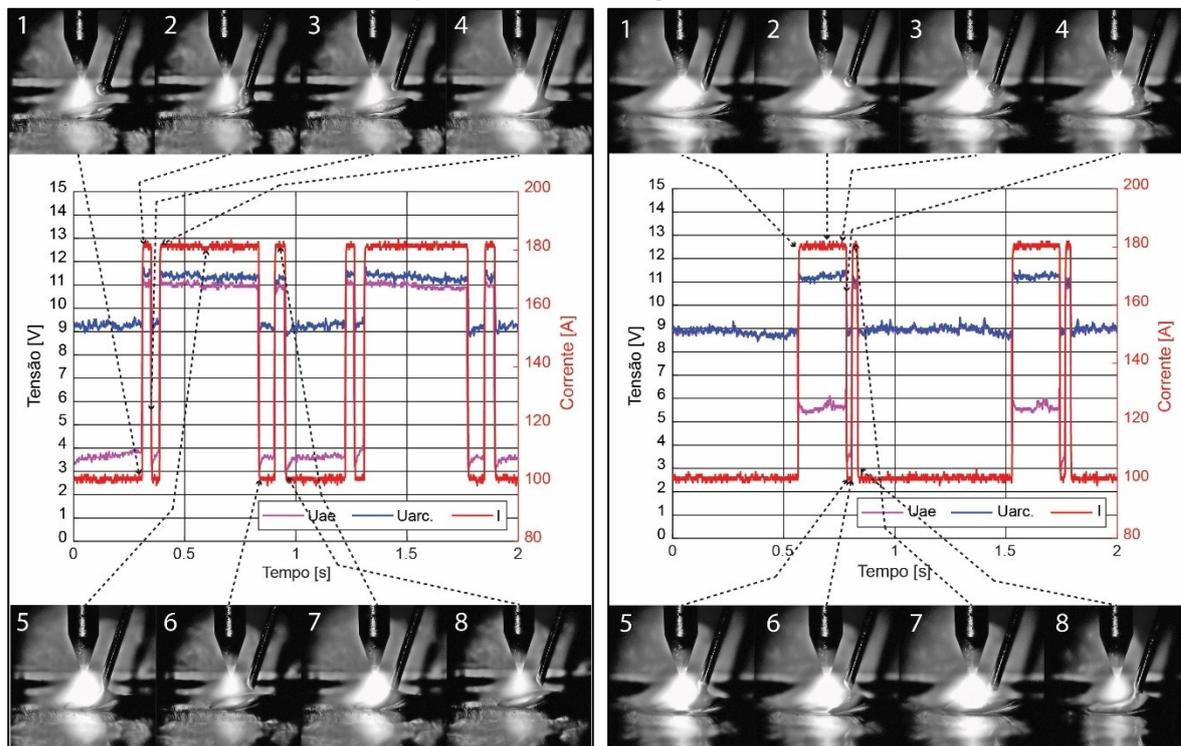
Figura 150 – Oscilogramas de tensão e velocidade de arame para ensaios sincronizados realizados com 1 Hz. S-pulso (esq.) e S-base (dir.)



Fonte: elaborado pelo autor.

A Figura 151 mostra em detalhes a transferência da gota para a frequência de 1 Hz. No caso de sincronismo no pulso, oscilograma à esquerda, no Quadro 1 é possível notar que ao final do período de base em ponte destacada, há uma gota formada na ponta do arame, a qual é rapidamente transferida por tensão superficial (Quadros 2 e 3). Após o período de ponte metálica em fase de pulso, nota-se que há uma segunda transferência de gota. Neste caso, devido ao período de desaceleração do arame, em certo momento a ponte metálica é rompida ao final da fase de pulso (quadro 6). Entretanto, o arame ainda continua avançando, promovendo uma segunda transferência de gota, porém de menor volume (Quadros 7 e 8).

Figura 151 – Detalhe da transferência da gota formada na ponta do arame antes do estabelecimento da ponte metálica na condição de s-pulso (esq.) e s-base (dir.).
Frequência de oscilação em 1 Hz.



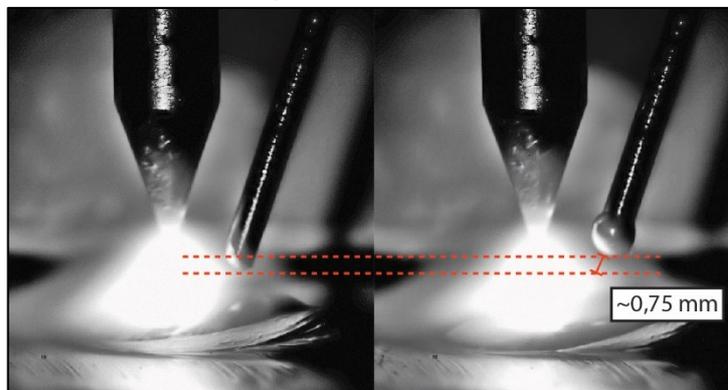
Fonte: elaborado pelo autor.

Já para o caso à direita da Figura 151, condição de sincronismo na base, o arame encontra-se destacado durante a fase de pulso e, entre os quadros 1 e 3, à medida que o arame avança, uma gota é formada na ponta, a qual é destacada por tensão superficial e rapidamente transferida à poça metálica (Quadro 4 e 5). À medida que o arame continua avançando, a ponte metálica é estabelecida e a fase de base se inicia. Os tempos médios da transferência da gota para a condição s-base foi de 4,7 ms, enquanto na condição s-pulso foram de 5,2 ms.

Voltando a Figura 149 é possível notar que o afastamento máximo do arame na frequência de 1 Hz em s-base foi maior que as demais frequências, mesmo que amplitude de recuo fosse nula. A formação da gota devido à condição de baixa velocidade de arame, e aceleração, durante o avanço em fase de pulso, faz com que a metal líquido formado na ponta do arame acabe “escalando”, por tensão superficial, o arame sólido, afastando-se da poça, fenômeno este conhecido também pelo termo em inglês “*melt-back*”. A Figura 152 mostra que entre a parada do arame e início do

movimento de avanço há um “afastamento” de aproximadamente 0,75 mm devido a formação da gota.

Figura 152 – Aumento do afastamento do arame devido a formação da gota.
Condição s-base em 1 Hz.



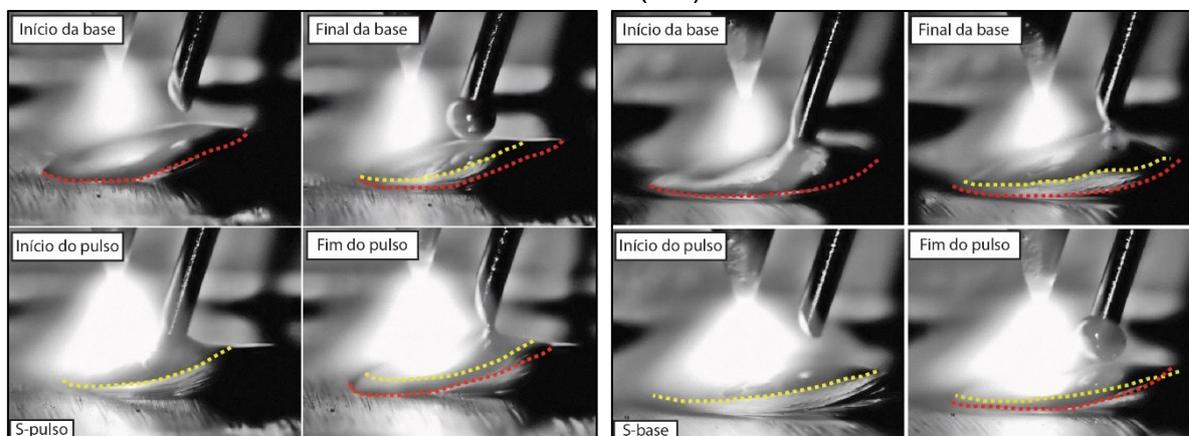
Fonte: elaborado pelo autor.

O destacamento de gota aconteceu nas duas condições de sincronismo, porém apenas na frequência de 1 Hz. Para as demais frequências não foram detectados destacamento e os oscilogramas mantiveram-se uniformes, conforme os mostrados na Figura 146.

A filmagem em alta velocidade também possibilitou observar a dinâmica de fusão e solidificação da poça em corrente pulsada. A Figura 153 mostra o início e fim de cada fase de corrente e condição de transferência, isto é, em ponte ou ponte destacada. Para o caso à esquerda, s-pulso, o início da base ocorre após a ruptura da ponte metálica, e a poça, que estava sob a corrente de pulso, apresenta um maior volume (frente de fusão vermelha). Já ao final do período de base, nota-se que o volume de metal líquido é menor (frente de fusão amarela) devido a solidificação da poça durante a fase de menor energia. Quando a ponte metálica é estabelecida, o início da fase de pulso ocorre quando o volume da poça é menor e, mesmo que material tenha sido alimentado à poça, esta tem seu volume aumentado, conforme mostram os quadros inferiores à esquerda. Já no caso de sincronia na base, à direita da figura, o início da base ocorre no momento do estabelecimento da ponte metálica, instante em que a poça apresenta seu maior volume devido a fase de pulso anterior em ponte destacada. Além da baixa energia de arco em corrente de base, que já promoveria a redução do volume, soma-se a adição do material, que, por sua vez, absorve energia da poça contribuindo para a solidificação. Após a ruptura, a fase de pulso se inicia na condição de menor volume da poça, porém, devido a condição ponte

destacada, o volume da poça aumenta consideravelmente durante este período, visto que toda energia, desconsiderando as perdas, é dedicada à fusão da poça.

Figura 153 – Efeito de contração e dilatação da poça para sincronia no pulso (esq.) e na base (dir.).



Fonte: elaborado pelo autor.

Estes comportamentos foram verificados em todas as frequências para a condição de sincronismo no pulso, até mesmo para 12 Hz, onde o período de transferência é de 83 ms, embora, na literatura técnica, frequências na ordem de 8-10 Hz já seriam consideradas elevadas para atribuir tal efeito termodinâmico da corrente pulsada [86, 87]. Entretanto, o presente caso não se trata de soldagem autógena, e além da corrente pulsada, existe a troca de calor entre poça e arame, tornando mais evidente esta dinâmica de fusão e solidificação.

O objetivo desta série de ensaios foi verificar se o sincronismo da corrente pulsada pudesse favorecer a redução da diluição. Para tanto, uma série de ensaios realizada em corrente constante fora executada com os valores médios de corrente obtidos nos ensaios sincronizados no pulso. Os ensaios foram executados nas frequências de oscilação de 3, 6, 9 e 12 Hz com as correntes de 132, 135, 138 e 133 A respectivamente. A Tabela 44 mostra os valores médios de potência para as três condições: s-pulso, s-base e l-med. Nota-se que para as frequências de 3 e 6 Hz, a potência para os ensaios em corrente constante foi intermediária às demais condições, sendo maior para s-pulso. Para as frequências de 9 e 12 Hz pode-se dizer que não houve uma diferença significativa (aprox. 4 % entre s-pulso e l-med em 12 Hz.). À medida que os percentuais de tempo de pulso e base, ou tempo em ponte e ponte

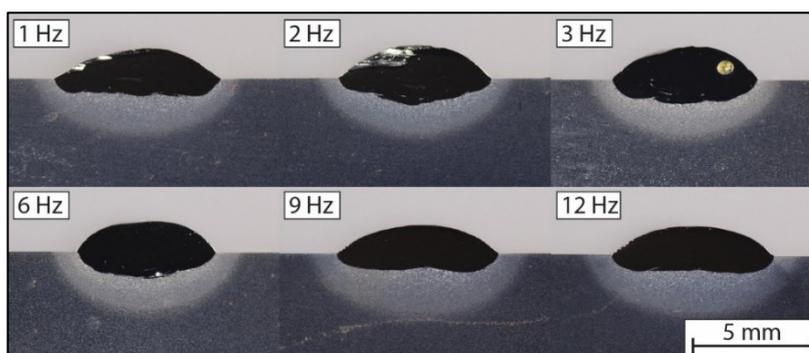
destacada, se aproximam (Figura 147), as potências tendem a apresentar valores médios próximos.

Tabela 44 – Valores de potência média para serie s-base, s-pulso e I-med

Frequência	P s-base [W]	P I-med [W]	P s-pulso[W]
3 Hz	1253	1307	1350
6 Hz	1118	1362	1383
9 Hz	1365	1369	1414
12 Hz	1342	1341	1399

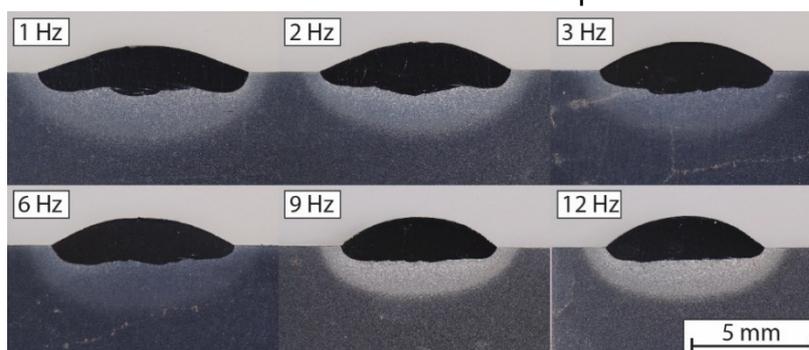
As macrografias de cada série de ensaios são mostradas na Figura 154 (s-base), Figura 155 (s-pulso) e Figura 156 (I-med) e o valores médios das dimensões medidas são listados na Tabela 45. Já a Figura 157 mostra a variação das dimensões para cada caso.

Figura 154 – Macrografias relativa aos ensaios com alimentação dinâmica sincronizada na corrente de base



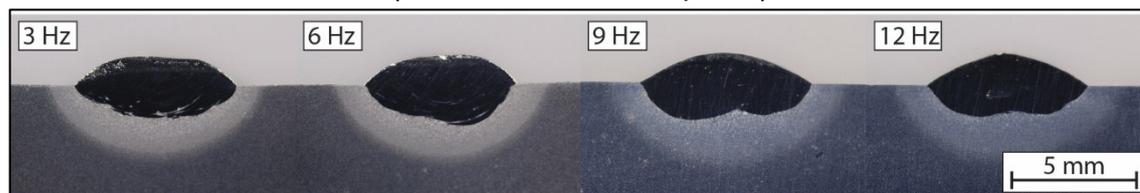
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 155 - Macrografias relativa aos ensaios com alimentação dinâmica sincronizada na corrente de pulso



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 156 - Macrografias dos ensaios com alimentação dinâmica em corrente média (I-med referente à s-pulso)

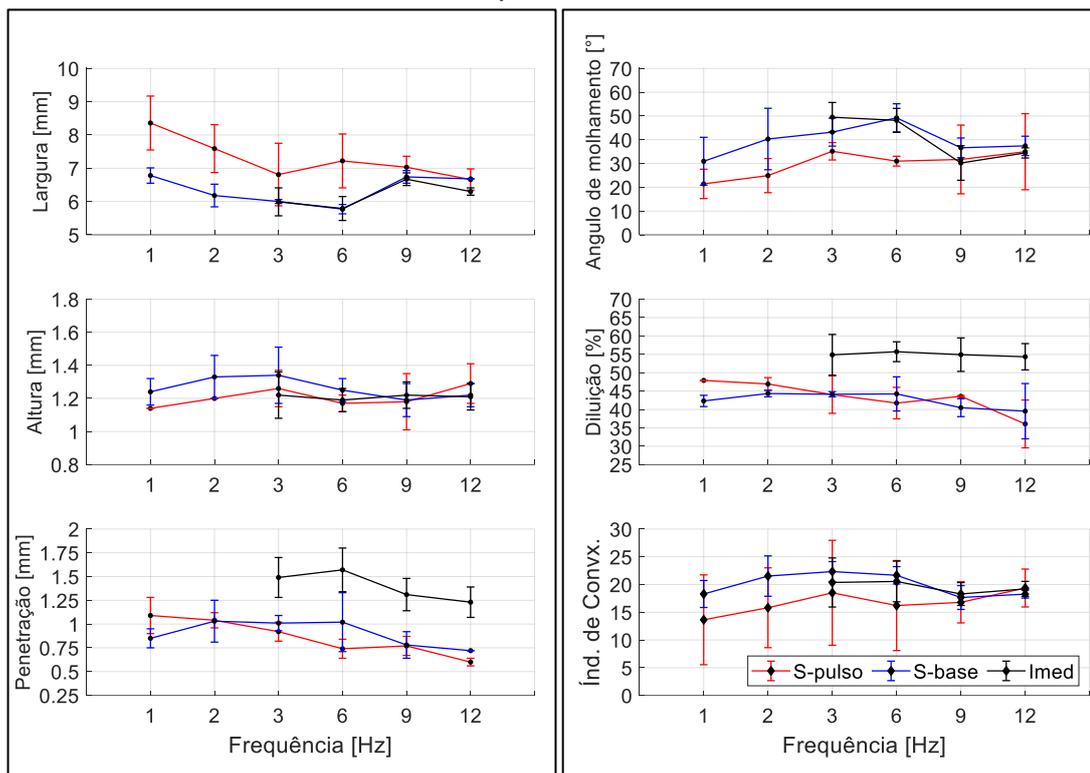


Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 45 – Valores médios das geometrias dos cordões de solda para a série com corrente pulsada sincronizada.

Série	F [Hz]	L [mm]	R [mm]	P [mm]	Am [°]	D [%]	IC
S-PULSO	1	8,36 ± 0,81	1,14 ± 0,01	1,09 ± 0,19	21,42 ± 6,17	47,91 ± 0,08	14 ± 1
	2	7,59 ± 0,72	1,20 ± 0,02	1,04 ± 0,0	24,91 ± 7,18	46,94 ± 1,74	16 ± 1
	3	6,81 ± 0,94	1,26 ± 0,11	0,92 ± 0,10	32,14 ± 3,66	44,04 ± 5,09	19 ± 4
	6	7,22 ± 0,81	1,17 ± 0,05	0,74 ± 0,10	30,99 ± 2,06	41,74 ± 4,28	16 ± 1
	9	7,03 ± 0,33	1,18 ± 0,17	0,77 ± 0,11	31,71 ± 14,46	43,59 ± 0,21	17 ± 3
	12	6,66 ± 0,32	1,26 ± 0,12	0,60 ± 0,04	34,96 ± 16,00	36,07 ± 6,50	19 ± 2
S-BASE	1	6,78 ± 0,23	1,24 ± 0,08	0,85 ± 0,10	30,94 ± 10,08	42,33 ± 1,54	18 ± 1
	2	6,18 ± 0,34	1,33 ± 0,13	1,03 ± 0,22	40,31 ± 12,93	44,34 ± 0,89	22 ± 1
	3	6,00 ± 0,06	1,34 ± 0,17	1,01 ± 0,08	43,20 ± 5,89	44,14 ± 0,70	22 ± 2
	6	5,77 ± 0,14	1,25 ± 0,07	1,02 ± 0,31	49,22 ± 5,92	44,24 ± 4,65	22 ± 1
	9	6,74 ± 0,19	1,19 ± 0,10	0,78 ± 0,14	36,61 ± 4,14	40,49 ± 2,43	18 ± 2
	12	6,68 ± 0,01	1,22 ± 0,07	0,72 ± 0,06	37,42 ± 4,07	39,54 ± 7,52	18 ± 1
I-MED	3	5,99 ± 0,42	1,22 ± 0,14	1,49 ± 0,21	49,48 ± 6,19	54,87 ± 5,55	20 ± 3
	6	5,79 ± 0,36	1,19 ± 0,07	1,57 ± 0,23	48,15 ± 5,05	55,72 ± 2,70	21 ± 2
	9	6,67 ± 0,19	1,22 ± 0,08	1,31 ± 0,17	30,21 ± 7,27	54,92 ± 4,56	18 ± 1
	12	6,30 ± 0,01	1,21 ± 0,28	1,23 ± 0,16	34,45 ± 2,14	54,35 ± 3,58	19 ± 2

Figura 157 - Gráficos da variação geométrica dos cordões para a série de ensaios com corrente pulsada sincronizada.



Fonte: elaborado pelo autor.

Iniciando pela largura do cordão, nota-se que os ensaios realizados com sincronia no pulso apresentaram uma largura superior aos ensaios s-base e I-med, sendo que estes apresentaram larguras de cordão bastante próximas. Pelas imagens da Figura 155, visivelmente é possível notar a variação geométrica para o caso de s-pulso, sendo que para as frequências de 1 e 2 Hz, casos de maior potência, a geometria do cordão acabou apresentando um aspecto diferente dos demais cordões. Vale lembrar também que nestas frequências não houve recuo em ponte. Já para os casos I-med e s-base, os cordões apresentaram um aspecto similar entre as frequências de 1 a 6 Hz (3 a 6 Hz para I-med) e a largura do cordão tendeu a diminuir. Já para as frequências de 9 e 12 Hz, para as duas condições é possível notar outro padrão geométrico dos cordões (Figura 154 e Figura 156), onde houve também um incremento na largura.

Quanto à altura do cordão, para as series s-pulso e s-base nota-se um pequeno aumento com o incremento da frequência de 1 para 3 Hz, onde então os valores médios passaram a diminuir. É interessante notar que a altura do cordão, a partir de 3 Hz, passou a diminuir mesmo que recuo em ponte passasse a ocorrer.

Ademais, para s-base, onde o período em ponte ocorreu durante a fase de base, menor energia, a altura foi maior que para s-pulso em todas as frequências, exceto para 12 Hz. O sincronismo da ponte metálica durante o período de base induziu, embora não medida, a uma menor temperatura da poça, logo os efeitos de repuxo por tensão superficial, atrelados ao movimento de recuo do arame, acabam sendo mais acentuados, o que proporcionou uma maior altura que para o caso s-pulso. Para a série I-med, a altura apresentou uniformidade entre as quatro frequências aplicadas, com valor médio de 1,21 mm. O resultado da altura do cordão e da largura refletiram no ângulo de molhamento e índice de convexidade do cordão. Para as séries de s-base e I-med, o ângulo de molhamento foi maior que para s-pulso, assim como o índice de convexidade, em todas as frequências, com exceção de 12 Hz.

Quanto à penetração, nas três condições houve uma redução nos valores médios com o aumento da frequência de oscilação do arame, entretanto, mesmo que os ensaios em s-pulso tenham apresentado uma potência ligeiramente maior, os ensaios em I-med apresentaram uma penetração bem maior. Isto levou também a uma diluição bem mais acentuada que para as condições s-pulso e s-base, atingindo valores da ordem de 55 %. No caso de s-base e s-pulso, a diluição foi menor, e diminuiu com o incremento da frequência de oscilação do arame.

Para avaliar as medições das geometrias do cordão, o método ANOVA também foi aplicado individualmente entre as séries, mas também em pares. Os valores p resultante da análise são mostrados na Tabela 46.

Tabela 46 - Valores de *p-value* referentes ao método ANOVA aplicado sobre os resultados geométricos da série de corrente pulsada sincronizada com AD.

Valores P para cada série						
Série	Largura	Reforço	Penetração	Âng. de Molh.	Diluição	Índice de convexidade
s-pulso	0,0211	0,1621	0,0009	0,1357	0,0076	0,0449
s-base	0,0002	0,1806	0,0409	0,0361	0,0155	0,0042
I-med	0,1101	0,9725	0,4891	0,1551	0,9901	0,6616
Valores P em pares						
Série	Largura	Reforço	Penetração	Âng. de Molh.	Diluição	Índice de convexidade
s-base / s-pulso	0,0001	0,0519	0,0003	0,0023	0,0028	0,0002
s-base / I-med	0,0010	0,3843	0,0027	0,0444	0,0009	0,0621
S-pulso / I-med	0,0004	0,5957	0,0007	0,0194	0,0001	0,0272

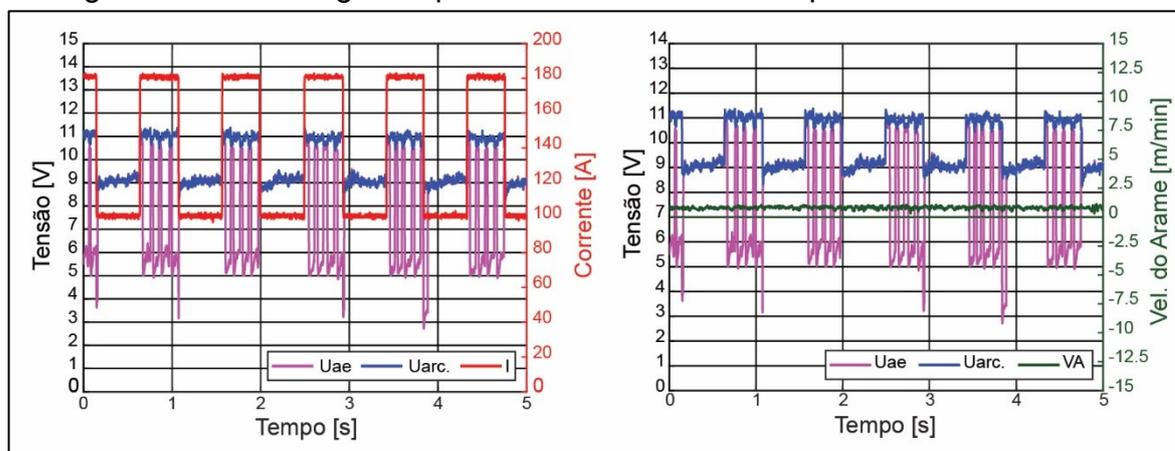
Conforme pode ser visto, a análise individual dentro de cada série mostra que para s-pulso, pode-se afirmar que houve uma variação significativa para a largura, penetração, diluição e índice de convexidade. Já para a altura do reforço e ângulo de molhamento, os valores *p* foram superiores à 0,05, o que não exclui a hipótese H_0 , ou seja, não se pode afirmar que houve uma variação significativa entre as médias. Para a condição s-base, apenas para o reforço a hipótese nula não pode ser rejeitada. Para as demais dimensões a análise de variância permite afirmar que houve uma diferença significativa entre as médias. Já para a série I-med, em nenhuma das dimensões rejeitou-se H_0 , e não se pode afirmar que houve uma variação significativa. Pela análise em pares, para as três combinações, o método mostrou que houve diferença entre as médias para todas as dimensões exceto par o reforço.

Além dos ensaios com corrente e alimentação dinâmica sincronizados, uma série de ensaios em corrente pulsada não sincronizada foi executada. O principal objetivo desta série era avaliar o comportamento da transferência metálica para a condição de corrente pulsada. Neste caso, a frequência de pulsação da corrente foi de 1 Hz, de modo que os efeitos termodinâmicos que levam à fusão e solidificação da poça, característico da corrente pulsada em frequências baixas, fossem mais acentuados.

Conforme apresenta na seção 3.4, a pulsação da corrente tende a desestabilizar a transferência metálica quando alimentação convencional de arame é aplicada, isto é, em VA constante. A alteração da energia disponível entre as fases de corrente acaba, por sua vez, alterando a capacidade de fusão do processo comprometendo a estabilidade da transferência metálica.

A Figura 158 mostra os oscilogramas de tensão e corrente (à esquerda) e tensão e Va (à direita) para o ensaio com frequência de pulsação de 1 Hz e VA constante. Conforme pode ser visto, durante o período de base o modo de transferência é caracterizado pela ponte contínua, e em todo seu período, a transferência em ponte se mantém estável. Entretanto, com o aumento da corrente durante a fase de pulso, nota-se consecutivos destacamentos, caracterizando a transferência em ponte intermitente. Neste caso, ocorreram em média, quarto destacamento durante a fase de pulso, com período médio em ponte, de 32 ms, porém com uma incerteza relativamente alta, de ± 8 ms. Conforme já comentado em seções anteriores, a transferência em ponte intermitente pode até resultar num procedimento estável, entretanto na frequência de pulsação de corrente baixa, a intermitência entre ponte contínua e ponte intermitente pode levar variações geométricas, ou até mesmo descontinuidades, dependendo da aplicação. Silva et al. [32] aponta que a ruptura da ponte metálica leva a formação da gota na ponta do arame, o que por sua vez, pode vir a contaminar o eletrodo, sobretudo em procedimentos fora de posição.

Figura 158 – Oscilograma para ensaios em corrente pulsada em 1 Hz e AC.

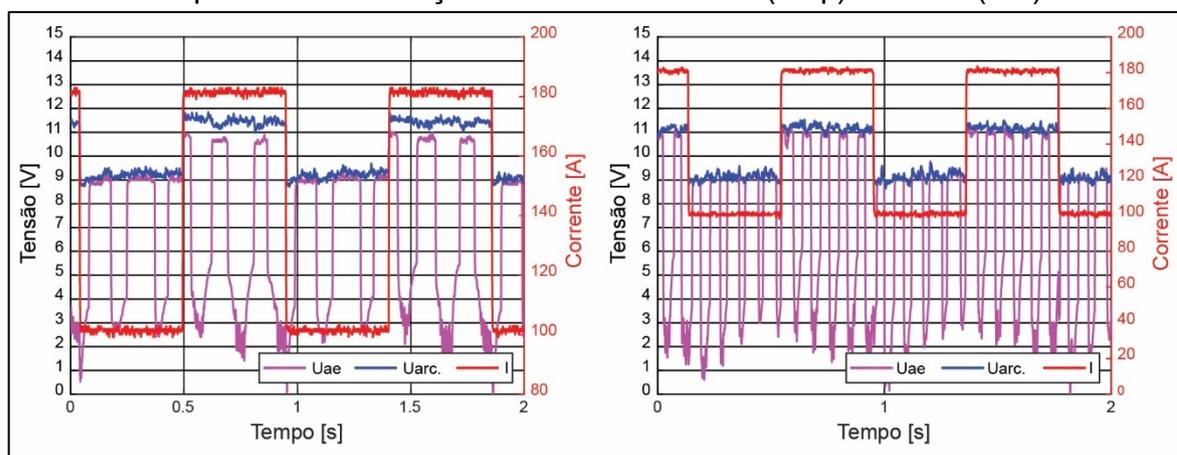


Fonte: elaborado pelo autor.

No caso do trabalho apresentado por Pigozzo [6], mesmo que a VA aumentasse durante o período de pulso, a baixa dinâmica de aceleração do cabeçote alimentador, levou a destacamentos de gotas no momento da transição da corrente, embora, em seguida, a ponte metálica fosse reestabelecida.

A Figura 159 mostra os oscilogramas de tensão e corrente para os ensaios em corrente pulsada e alimentação dinâmica de 5 Hz e 10 Hz. Embora a alimentação dinâmica esteja presente em ambos as fases da corrente, é possível notar que os períodos em ponte metálica de ponte destacada são diferentes para as fases de pulso e base. Assim como para a série com sincronismo de corrente, os períodos em ponte metálica durante a fase de base foram maiores que durante a fase de pulso, ainda que a frequência de oscilação fosse mantida. Para o caso de 5 Hz de frequência de oscilação, o período em ponte durante a fase de pulso teve uma duração média de 61 ± 5 ms, enquanto na fase de base foi de 93 ± 9 ms, aproximadamente 50 % maior. Já em 10 Hz, a diferença entre os períodos em ponte durante a fase de pulso e base foram menores. Neste caso, durante o pulso de corrente o tempo médio em ponte foi de 33 ± 3 ms, enquanto na base foi de 42 ± 5 ms, 27 % maior.

Figura 159 – Oscilogramas de tensão e corrente para corrente pulsada em 1 Hz e frequência de oscilação do arame em 5 Hz (esq.) e 10 Hz (dir.).



Fonte: elaborado pelo autor.

Ainda que o período em ponte durante a fase de base tenha sido maior, o aumento da frequência de oscilação tende a diminuir a diferença entre os tempos. Para uma frequência de oscilação do arame de 15 Hz, esta diferença caiu para 17 %. Comparados ao ensaio realizado com Va constante, a transferência metálica é uniforme e estável em ambas as fases da corrente nos ensaios com AD, o que torna

o processo mais robusto e com melhor repetibilidade dos eventos relativos à transferência metálica. Ademais, frequências de oscilação do arame tendem a uniformizar ainda mais os ciclos de transferência, visto que os períodos em ponte e ponte destacado tendem a se aproximar, conseqüentemente, outras variáveis, tais como o mergulho e recuo em ponte.

5.4 Ensaios de soldagem aplicados

Conforme apresentação na seção 4.10.1, paralelamente ao desenvolvimento deste trabalho, foram realizados ensaios utilizando ligas com carbeto de tungstênio para aplicações de revestimentos duros. Os resultados obtidos foram bastante interessantes, e como um estudo de caso de aplicabilidade industrial, optou-se por inserir no contexto deste trabalho. Contudo, uma vez que a presente tese não tinha como objetivo principal investigações sobre procedimentos de hardfacing, não foi inserido na seção de revisão bibliográfica o assunto aqui abordado. Assim sendo, uma breve revisão será apresentada nesta seção.

5.4.1 Revestimento duro com carbetos de tungstênio

As tecnologias de revestimento duro para aumentar a resistência ao desgaste e à corrosão são amplamente utilizadas em setores industriais como a mineração, construção, agricultura, entre outras. A degradação das superfícies dos componentes está associada a diferentes mecanismos de desgaste, como abrasão, impacto, calor e corrosão, o que reduz sua vida útil, levando a paradas de manutenção e aumento dos custos de produção [25].

Revestimentos à base de Fe, Ni e Co são comumente usados para melhorar as resistências ao desgaste e à corrosão das superfícies [24, 88]. Recentemente, partículas sólidas, como carbonetos de tungstênio (WC) e carbonetos de titânio (TiC), foram adicionadas a ligas de revestimento duro para obter compósitos de metal-cerâmica (MMC – Metal Matrix Composites), que possuem alta dureza, boa resistência ao desgaste e molhabilidade do cordão [89].

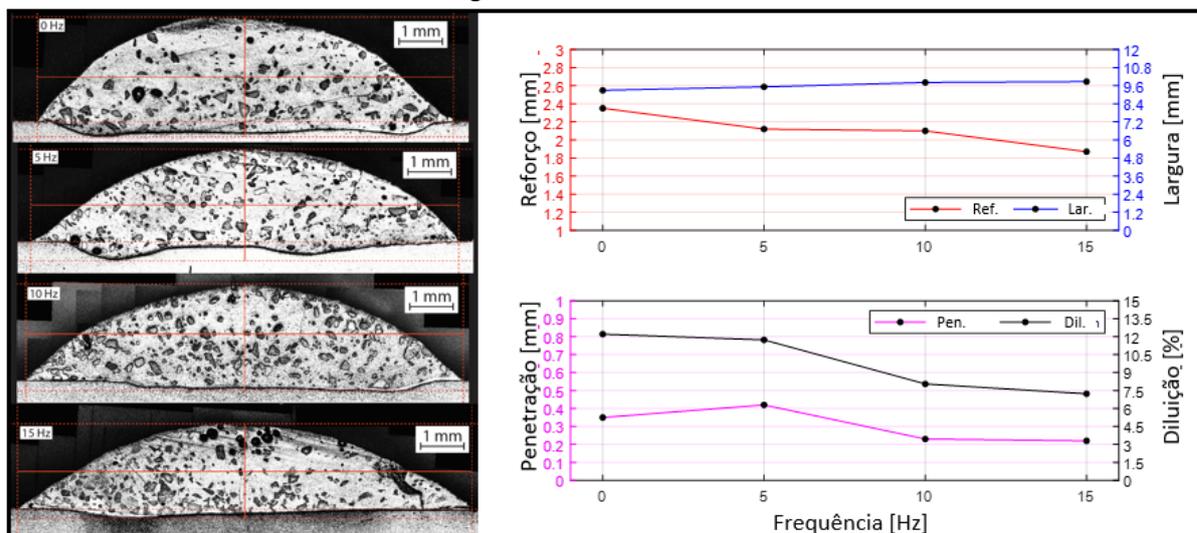
No entanto, o comportamento ao desgaste do revestimento não está apenas associado à presença de carbonetos, mas também às microestruturas e fases da matriz do metal de solda, bem como à quantidade e uniformidade da distribuição das

partículas de carboneto entre os cordões de solda. Devido à maior densidade dos carbonetos de tungstênio (na ordem de 8-9,5 g/cm³), estes tendem a se concentrar no fundo dos cordões de solda durante o processo de solidificação, resultando em uma distribuição não homogênea no revestimento [90]. Wu et al. [91] e Acker et al. [92] mostraram que a homogeneidade da dispersão das partículas de carboneto está associada ao número de partículas na matriz metálica. Os autores estudaram a porcentagem de partículas de WC adicionadas a ligas à base de Ni e avaliaram propriedades mecânicas, como dureza e resistência à abrasão. Fernandez et al. [93] mostrou que quanto maior a quantidade (wt%) de partículas de WC, maior é a dureza da fase da matriz em ligas à base de Ni. O mesmo resultado foi obtido por Xu et al. [94] ao avaliar revestimentos de WC/Ni com diferentes teores de partículas de WC. Garcia et al. [95] afirma que o aumento da dureza da matriz está associado à formação de carbonetos secundários durante o processo de revestimento e pelo fato de que as partículas de WC contribuem para gerar uma estrutura eutética refinada na liga de Ni.

Dentro deste contexto, o foco dos ensaios foi avaliar a influência da alimentação dinâmica de arame na dispersão dos carbonetos. Ademais, foram avaliados a microdureza e a resistência a abração dos depósitos.

A Figura 160 mostra as seções transversais dos cordões realizados. Os resultados mostram que o aumento da frequência de oscilação provocou uma redução do reforço dos cordões e no aumento da largura. Para o cordão de 15 Hz, o reforço do 20,4 % menor que para o ensaio com alimentação convencional (1,87 mm contra 2,35 mm). Para AD em 5 Hz e 10 Hz, a redução foi de 9,8 % (2,12 mm) e 10,6 % (2,10 mm) respectivamente, quando comparados com alimentação convencional. Com relação à largura dos cordões de solda, o experimento realizado com 15 Hz de oscilação foi 6,2 % mais largo que o ensaio em AC (9,87 mm contra 9,29 mm). Para 5 Hz o aumento foi de 2,5 % (9,52 mm) enquanto 10 Hz apresentou um aumento de 5,6 % (9,81 mm).

Figura 160 – (Esq.) Seções transversais dos depósitos sobre chapa. (Dir.) Medições da geometria dos cordões.



Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 47 – Valores geométricos dos cordões tipo *bead on plate* para ensaios de revestimento duro.

	Reforço (mm)	Penetração (mm)	Largura (mm)	Diluição (%)
0 Hz	2,35 ± 0,16	0,35 ± 0,09	9,29 ± 0,43	12,21 ± 1,10
5 Hz	2,12 ± 0,26	0,42 ± 0,11	9,52 ± 0,28	11,73 ± 0,86
10 Hz	2,10 ± 0,14	0,26 ± 0,15	9,83 ± 0,31	8,05 ± 0,98
15 Hz	1,87 ± 0,17	0,22 ± 0,07	9,87 ± 0,45	7,20 ± 1,05

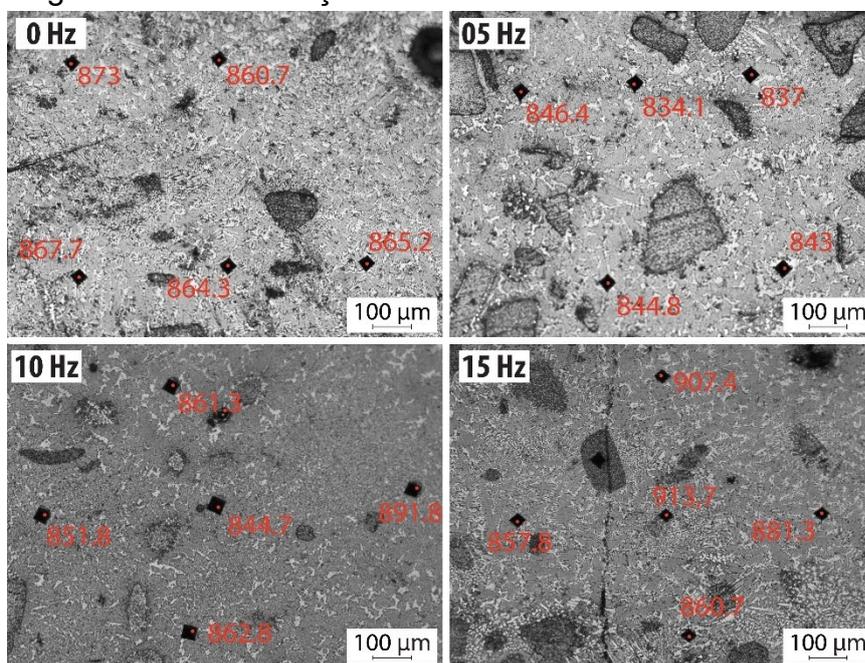
Diferente dos resultados obtidos nos ensaios utilizando arames de aço inoxidável 309 Lsi, o reforço e largura dos cordões variaram de maneira oposta, isto é, o incremento da frequência aumentou a largura e diminuiu o reforço. Uma hipótese levantada para explicar esse fenômeno se dá pela redução da tensão superficial para arame tubulares, logo, os efeitos de puxar a poça no movimento de recuo do arame são minimizados, enquanto a agitação da poça ainda continue presente, favorecendo trocas térmicas e espalhando mais o material.

Ainda sobre a geometria os cordões, a penetração máxima foi menor para o ensaio de 10 Hz (0,26 mm) e 15 Hz (0,22 mm) em comparação à AC (0,35 mm). Embora para 5 Hz a máxima penetração tenha sido superior (0,42 mm), a diluição foi menor. Para o ensaio com alimentação convencional, a diluição foi de 12,21% enquanto para 5, 10 e 15 Hz foi de 11,73, 8,05 e 7,20 % respectivamente. Neste sentido, os resultados apresentaram a mesma tendência dos resultados anteriores.

Embora não tenha sido aplicada a análise de variância (ANOVA), o teste de correlação de Pearson mostra que há uma forte correlação entre a frequência de oscilação do arame com o reforço, largura e diluição do cordão. No caso da penetração, não se pode afirmar que uma correlação linear (valor-p maior que 0,05), uma vez que o valor mais alto foi para o ensaio em 5 Hz.

Seguindo a análise dos resultados, os testes de microdureza realizados na matriz de solda mostraram uma pequena variação nos valores de dureza. A média das medições foram 866,1, 843,1, 862,5 e 884,7 HV1 para 0, 5 10 e 15 H respectivamente. A maior diferença foi entre 5e 15 Hz (38,3 HV1 – 4,5 %). Entretanto, por meio da análise de variância não foi possível afirmar que houve uma variação significativa entre as médias.

Figura 161 – Indentações do teste de microdureza Vickers.



Fonte: elaborado pelo autor.

Os valores de microdureza medidos na superfície dos cordões, conforme apresentado na seção 4.5.1, são mostrados na Tabela 48. Como pode ser observado, a alimentação dinâmica aumentou a dureza na superfície dos cordoes. Para a amostra de 15 Hz, a dureza foi 17,6 % maior que para a amostra com alimentação convencional. Os valores p obtidos pela análise de variância, indicam que há uma diferença significativa entre as médias obtidas. Vale ressaltar que a análise de variância foi feita par-a-par entre as amostras de alimentação dinâmica com

alimentação convencional. Considerando apenas as amostras de AD, não se pode afirmar que há uma diferença significativa entre as médias.

Tabela 48 – Medição de microdureza nas superfícies dos cordões de revestimento duro.

Indentação	0 Hz	5 Hz	10 Hz	15 Hz
1	810,4	978,9	828,9	955,2
2	929,1	1042,0	1085,9	935,8
3	905,9	940,5	1012,3	1025,7
4	955,7	936,4	984,7	1090,9
5	1066,7	923,5	1049,2	913,3
6	914,7	993,4	1084,6	1152,4
7	798,9	1027,6	962,4	1171,6
8	836,6	1161,6	1049,0	1185,2
9	1006,3	1089,0	954,2	1124,2
Média.	902,3	1010,3	1001,2	1061,6
Desv.Pad.	88,0	78,7	81,0	106,6
p-value⁽¹⁾ (ANOVA)	-	0,027	0,045	0,010

⁽¹⁾valor-p comparado com a amostra de alimentação convencional (0Hz)

Ainda sobre a microdureza, também foi medida sobre as partículas de carbeto dispersas no cordão. As partículas medidas foram aleatoriamente selecionadas sobre a superfície do cordão. Os valores variaram entre 1247,8 e 1596 HV0,3, com uma média de 1460 HV0,3 (Tabela 49)

Tabela 49 – Valores de microdureza medidos sobre as partículas de carbeto.

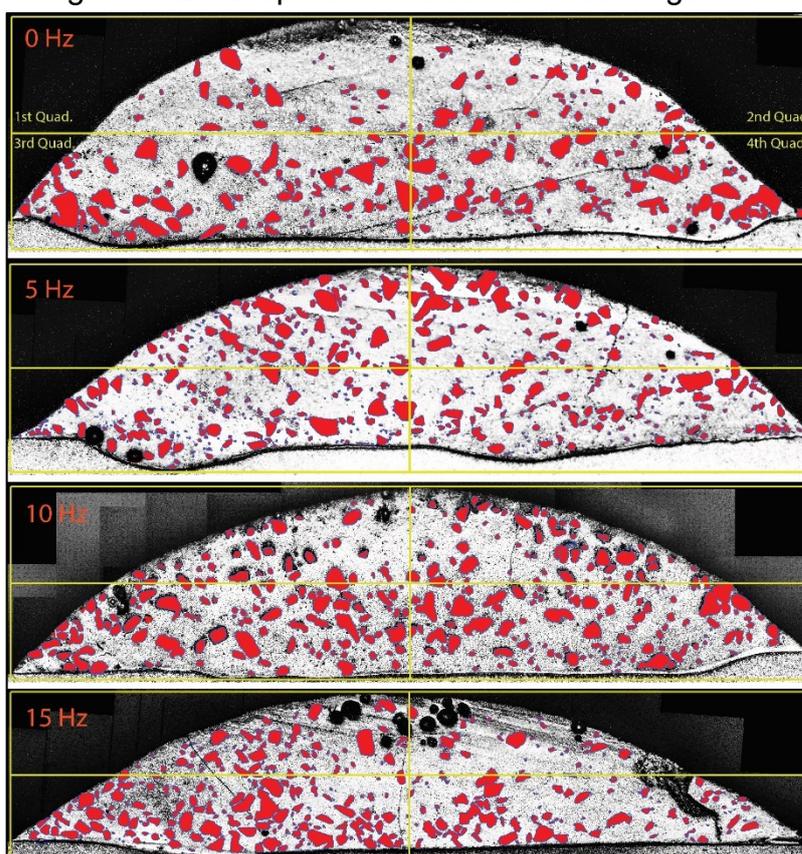
	0 Hz	5 Hz	10 Hz	15 Hz
Idt. 01 (HV0.3)	1530,6	1596,6	1506,0	1498,6
Idt. 02 (HV0.3)	1319,9	1247,8	1478,8	1546,8
Idt. 03 (HV0.3)	1523,4	1554,1	1375,6	1348,6
Média (HV0.3)	1458,0	1466,0	1453,5	1464,7

Os valores médios foram semelhantes entre todas as condições. Estatisticamente, pode-se afirmar que a média das durezas são iguais nas quatro condições. Ademais, a dureza média dos carbeto é aproximadamente 62% superior

à média das superfícies, e quase 70% que a média na matriz do metal de solda para a amostra em alimentação convencional.

O aumento da dureza na superfície pode ser explicado pelo padrão de dispersão das partículas de carbeto dentro da matriz de solda. A avaliação da dispersão foi feita nos quatro quadrantes da área da seção transversal, conforme mostra a Figura 162, e o percentual da área coberta pelas partículas de carbeto (destacados em vermelho) foi considerado. Os valores medidos são mostrados na Tabela 50

Figura 162 – Dispersão dos carbetos de tungstênio.



Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 50 – Área coberta pelos carbeto de tungstênio por quadrante.

Amostra	Quadrante	Area dos carbetos (%)	Amostra	Quadrante	Area dos carbetos (%)
0 Hz (Conv.)	1	12,0	5 Hz	1	38,7
	2	19,9		2	47,7
	3	37,8		3	48,5
	4	34,0		4	42,5
	Avrg, / std	27,8 / 12,1		Avrg, / std	44,7 / 4,6
10 Hz	1	20,1	15 Hz	1	44,8
	2	26,2		2	21,8
	3	39,5		3	69,3
	4	38,9		4	43,5
	Média / Desv.p	33.2 / 9.6		Média / Desv.p	48.6 / 19.4

Para a alimentação convencional, os quadrantes superiores mostraram menos carbeto dispersos que os quadrantes inferiores. Nos demais experimentos, realizado com alimentação dinâmica, os quadrantes superiores também apresentam menor quantidade de carbeto, entretanto, o percentual foi bem mais elevado que para a condição de AC. Para esta amostra, o arame não promove a agitação da poça de fusão. Devido à maior densidade das partículas de carbonetos, elas tendem a se acumular na parte inferior do cordão de solda, conforme avaliado por Fan et al. [90].

Dentre as amostras, o ensaio 5 Hz apresentou a maior área coberta pelas partículas de carbeto de tungstênio nos quadrantes superiores (38,7 e 47,7 %). Além disso, apresentou o menor desvio padrão entre os quadrantes (4,6%). Neste método, quanto menor o desvio padrão, mais uniforme é a dispersão das partículas. Para a amostra de 15 Hz, os desvios padrão foram os mais acentuados, entretanto, apresentou a maior área coberta (48,6 %). Como pode ser observado, neste ensaio as partículas estão concentradas nos quadrantes 1 e 3, sendo que o 3º quadrante é o que apresenta a maior área coberta (69,3 %). Embora o desvio padrão ser utilizado como critério para análise da dispersão das partículas, o método sugerido por Yuan et al. [96], que consiste em medir a distância entre os carbeto, é mais apropriado para avaliar a homogeneidade da dispersão.

A melhor dispersão dos carbonetos de tungstênio para os ensaios realizados com alimentação dinâmica pode ser explicada pela agitação forçada da poça promovida pela oscilação do arame. Considerando que os carbeto, que não são

dissociados na matriz, permanecem no estado sólido dentro do metal líquido, quanto melhor for a agitação da poça melhor será a dispersão das partículas.

Além da influência sobre a dureza da superfície dos cordões, a dispersão dos carbonetos também refletiu nos resultados de teste de abrasão, considerando que a resistência a abrasão é fortemente ligada à dureza do material. Como a dureza das partículas de carbonetos é muito maior que a da matriz de solda, quanto mais carbonetos presentes nos quadrantes superiores, maior será a resistência ao desgaste. Os resultados obtidos no teste de abrasão ASTM G65 realizados nos ensaios de sobreposição são mostrados na Tabela 51.

Tabela 51 – Perda de massa no teste de abrasão.

Amostra	Massa inicial (g)	Massa final (g)	Massa perdida (mg)
0 Hz	141,255	140,799	456 (ref.)
10 Hz	158,189	157,869	320 (- 29,8%)

Conforme pode ser observado, a amostra realizada com AD apresentou uma expressiva redução na perda de massa após o teste de abrasão, quase 30 % a menos que a amostra com AD. Para 10 Hz, a dureza da superfície e a área coberta pelos carbonetos foram 11% e 14% maiores respectivamente. De acordo com Garcia et al. [95], a resistência ao desgaste aumenta exponencialmente com o aumento da concentração de WC. Wang et al. [97] mediu a densidade de distribuição das partículas de WC na superfície e, segundo o autor, quanto maior a densidade, maior é a resistência ao desgaste.

6 CONCLUSÕES

Tendo em vista a caracterização do processo TIG com alimentação dinâmica, priorizando aspectos que concernem a transferência metálica e a influências dos parâmetros de alimentação de arame sobre o cordão de solda, a partir dos resultados obtidos, pode-se concluir que:

- O comportamento da oscilação do arame na saída da tocha é fortemente influenciado pelo método de oscilação utilizado, bem como pela disposição e arranjo dos osciladores e conduítes na bancada. Neste sentido, o Módulo de Oscilação do Conduíte (MOC), posicionado próximo a tocha, mostra-se mais eficiente e robusto para promover a oscilação do arame, garantindo maior repetibilidade dos parâmetros de oscilação, sobretudo a amplitude. Módulos baseados na oscilação do bloco de rolete apresentaram grande variação da amplitude de oscilação, sobretudo em comprimentos maiores de conduítes e na presença de curvas ao longo da guia.
- O monitoramento da tensão entre arame e eletrodo é uma ferramenta eficaz para a detecção precisa do momento de estabelecimento da ponte metálica, bem como sua ruptura. Associada ao sinal de velocidade do arame aquisitado, variáveis indiretas podem ser facilmente quantificadas no pós-processamento de dados. No entanto, a tensão de referência que define a condição de ponte metálica deve ser regulada de acordo com a parametrização do processo.
- A variação dos parâmetros de oscilação do arame, sobretudo da frequência de oscilação, altera significativamente as velocidades de avanço e recuo do arame bem como nos períodos da transferência metálica. Associadas ao demais parâmetros do processo, influenciam nas variáveis indiretas levantadas tais como tempo em ponte, mergulho do arame, recuo em ponte, etc.

- A variação da frequência de oscilação apresenta forte correlação com a variação geométrica dos cordões, sendo que para maiores frequências os cordões apresentaram menor penetração e diluição, além de um incremento na altura e ângulo de molhamento. Ademais, a influência da alimentação dinâmica de arame é mais acentuada em condições de maior nível de energia.
- Cordões realizados com alimentação dinâmica apresentam microestrutura com grãos mais refinados, os quais, por sua vez, levaram a medições de maior dureza no metal de solda, em comparação com a alimentação convencional. As medições termográficas sugerem que para o caso de AD houve uma maior taxa de resfriamento da poça, visto que as trocas de calor entre poça e peça foram mais eficientes devido a agitação forçada da poça, o que justifica o refino de grão para o caso de frequências mais elevadas.
- A técnica de inserção de topo permite que procedimentos omnidirecionais sejam executados. No entanto, diferente do que a literatura técnica apresenta, há relevantes variações nas geometrias dos cordões para as diferentes posições de inserção do arame. Para que haja uniformidade na geometria do cordão, sugere-se que processos adaptativos sejam empregados, sobretudo em procedimentos de manufatura aditiva, onde a uniformidade geométrica dos cordões é fundamental para a qualidade final da peça fabricada.
- A sincronia da corrente pulsada com os ciclos de alimentação dinâmica mostra grande potencial para aplicações de revestimento e manufatura aditiva. A condição de sincronismo no pulso apresenta menor diluição associada ao menor ângulo de molhamento e índice de convexidade, favoráveis para procedimentos de revestimentos. Já a condição de sincronia na base apresenta maiores ângulos de molhamento e índice de convexidade, favoráveis para manufatura aditiva. Ademais, a lógica de sincronia baseada no monitoramento da tensão arame-eletrodo se mostra eficaz e relativamente simples de ser implementada, no entanto

é necessário que a fonte de soldagem permita a comunicação serial bem como a programação de diferentes programas de soldagem.

- A alimentação dinâmica de arame apresenta forte influência na dispersão de carbonetos de tungstênio no procedimento de revestimento duro. A agitação forçada da poça faz que as partículas fiquem suspensas na poça metálica, apresentando maiores concentrações na região superior do cordão quando comparado com alimentação convencional. A maior presença de carbonetos nos quadrantes superiores leva a uma maior dureza da superfície bem como um aumento considerável da resistência a abrasão dos revestimentos.

O presente trabalho de doutorado representa mais um degrau nas investigações das técnicas de alimentação de arame no processo TIG. Os resultados apresentam relevantes contribuição à comunidade científico-acadêmica bem como para as aplicações industriais. O mapeamento do processo TIG com alimentação de arame, bem como sua caracterização e monitoramento é fundamental para garantir repetibilidade, produtividade e qualidade.

7 TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho mostrou que a alimentação dinâmica de arame associada a técnica de inserção de topo apresenta grande potencial científico e aplicabilidade industrial. Para dar continuidade à linha de pesquisa proposta, sugere-se os seguintes trabalhos futuros:

- Investigar o uso da alimentação dinâmica de arame sob inserção de topo sincronizada com a corrente pulsada em procedimentos de manufatura aditiva e revestimento;
- Explorar técnicas mais avançadas para medições de temperatura utilizando pirômetros de duas cores e termopares para elevadas temperaturas, por exemplo, termopares de tungstênio-rênio;
- Avaliar aspectos termodinâmicos para a técnicas de alimentação sincronizada;
- Transformar o método de caracterização em uma ferramenta de uso acadêmico e comercial com interfaces personalizadas para o monitoramento e controle de processos de soldagem com alimentação dinâmica;

8 REFERÊNCIAS

- [1] American Welding Society. (2004) Welding Handbook: welding processes, Part 1, 9th ed. AWS, Miami
- [2] Air Liquide welding (2008) TOPTIG: a new robot welding process for industry
- [3] Plasch S (1999) Verfahren zur Steuerung der Drahtzufuhrbewegung für WIG-Schweißgeräte und Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens
- [4] TIPTIG (2021) The TIP TIG arc welding process. [https:// TipTIG. com/ arc- weldi ng- proce ss/](https://TipTIG.com/arc-welding-process/). Accessed 25 Aug 2024
- [5] Delgado LC (2000) Estudo e desenvolvimento do processo TIG com alimentação automática e arame. Florianópolis
- [6] Pigozzo IO (2015) Soldagem TIG orbital: otimização de equipamentos e prospecções tecnológicas para procedimentos de passe de raiz. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de santa Catarina
- [7] Paes LE dos S (2016) Soldagem TIG orbital – técnica de alimentação dinâmica do arame visando aumento na produtividade. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina
- [8] Godinho C (2017) Avaliação experimental do processo de soldagem TIG automatizado alimentado com reduzidos ângulos de inserção de arame em relação ao eletrodo. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de santa Catarina
- [9] Riffel K (2018) Avanços Tecnológicos Do Processo TIG: Técnicas Inovadoras De Alimentação De Arame E Procedimentos Automatizados Como Contribuição Para A União De Tubos Internamente Cladeados. Universidade Federal de santa Catarina
- [10] Rosa AF da (2019) Estudo do processo TIG com estratégias inovadoras de inserção de arame para aplicação em soldagem Orbital. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de santa Catarina
- [11] Dornelles JM (2022) Análise da influência da frequência de alimentação dinâmica de arame na soldagem com processo plasma de aço inoxidável 309L aplicada à manufatura aditiva. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina
- [12] A history of welding. <http://www.weldinghistory.org/>. Accessed 14 Aug 2024
- [13] Meredith R (1942) Welding Torch. 4p

- [14] Cirino LM (2009) Estudos dos Efeitos da Polaridade na Soldagem com Corrente Contínua e Alternada pelos Processos TIG e MIG/MAG. Universidade Federal de Santa Catarina
- [15] Lancaste JF (1986) The physics of welding, 2nd ed. Pergamon
- [16] Dutra. J. C (2023) Ciência e Tecnologia da Soldagem a Arco Voltaico dos Fundamentos às Modernas Técnicas., 1st ed. Alfa Centauri, Florianópolis
- [17] Messler RWJr (1999) PRINCIPLES OF WELDING Processes, Physics, Chemistry, and Metallurgy, 1st ed. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, New York
- [18] Dutra JC, Riffel KC, Silva RHG e, Ramirez AJ (2023) A Contribution to the Analysis of the Effects of Pulsed Current in GTAW Welding of 1-mm-Thick AISI 304 Sheets. *Metals (Basel)* 13:1387. <https://doi.org/10.3390/met13081387>
- [19] Lu SP, Qin MP, Dong WC (2013) Highly efficient TIG welding of Cr13Ni5Mo martensitic stainless steel. *J Mater Process Technol* 213:229–237. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2012.09.025>
- [20] Santos FJ dos (2021) Conceção, caracterização e aplicação de tecnologia para oscilação longitudinal do arame no processo de soldagem TIG. Universidade Federal de Santa Catarina
- [21] Schwedersky MB, Dutra JC, Okuyama MP, Silva RHG e (2011) Soldagem TIG de elevada produtividade: influência dos gases de proteção na velocidade limite para formação de defeitos. *Soldagem & Inspeção* 16:333–340. <https://doi.org/10.1590/S0104-92242011000400004>
- [22] Mendez PF, Eagar TW (2003) Penetration and defect formation in high current arc welding. Argonne, IL (United States)
- [23] Schwedersky MB, Gonçalves e Silva RH, Dutra JC, de Santana Weizenmann G, Bonacorso NG (2017) Switch back technique enhances the productivity of the TIG welding process. *Welding in the World* 61:971–977. <https://doi.org/10.1007/s40194-017-0465-6>
- [24] Ahn DG (2013) Hardfacing technologies for improvement of wear characteristics of hot working tools: A review. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing* 14:1271–1283
- [25] Garbade RR, Dhokey NB (2021) Overview on Hardfacing Processes, Materials and Applications. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing Ltd

- [26] Cunha TV da, Dutra JC, Silva RHG, Gohr Junior R Desenvolvimento de um sistema adaptativo de alimentação de arame para o processo TIG
- [27] Geng H, Li J, Xiong J, Lin X, Zhang F (2017) Optimization of wire feed for GTAW based additive manufacturing. *J Mater Process Technol* 243:40–47. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.11.027>
- [28] Figueirôa DW, Pigozzo IO, Silva RHG e, Santos TF de A, Urtiga Filho SL (2017) Influence of welding position and parameters in orbital tig welding applied to low-carbon steel pipes. *Welding International* 31:583–590. <https://doi.org/10.1080/09507116.2016.1218615>
- [29] Chen S, Zhang S, Huang N, Zhang P, Han J (2016) Droplet transfer in arcing-wire GTAW. *J Manuf Process* 23:149–156. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2016.05.014>
- [30] Ouyang JH, Wang H, Kovacevic R (2002) Rapid prototyping of 5356-aluminum alloy based on variable polarity gas tungsten arc welding: process control and microstructure. *Materials and Manufacturing Processes* 17:103–124. <https://doi.org/10.1081/AMP-120002801>
- [31] Zhao DB, Chen SB, Wu L, Dai M, Chen Q Intelligent Control for the Shape of the Weld Pool in Pulsed GTAW with Filler Metal
- [32] Silva RHG, Riffel KC, Okuyama MP, Dalpiaz G (2019) Effect of dynamic wire in the GTAW process. *J Mater Process Technol* 269:91–101. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.01.033>
- [33] Pigozzo IO, e Silva RHG, Galeazzi D, Pereira AS (2022) Pulsed dynamic wire feeding with low insertion angle in GTAW process: a metal transfer characterization. *Welding in the World* 66:2107–2118. <https://doi.org/10.1007/s40194-022-01352-y>
- [34] Silva RHG, Paes LE dos S, Marques C, Riffel KC, Schwedersky MB (2019) Performing higher speeds with dynamic feeding gas tungsten arc welding (GTAW) for pipeline applications. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* 41:38. <https://doi.org/10.1007/s40430-018-1529-2>
- [35] Rudy JF (1982) Development and Application of Dabber Gas Tungsten Arc Welding for Repair of Aircraft Engine, Seal Teeth
- [36] Silva RHG e, Silva RGN, Schwedersky MB, Dalpiaz G, Dutra JC (2019) Contributions of the High Frequency Dynamic Wire Feeding in the GTAW

- Process for Increased Robustness. *Soldagem & Inspeção* 24:.. <https://doi.org/10.1590/0104-9224/si24.30>
- [37] TipTIG® TipTIG Welding Process - Dynamic Wire Feeding. <https://TipTIG.com/arc-welding-process/>. Accessed 12 Jan 2025
- [38] Craig E (2011) New process, new welding dynamics. *Welding technology provides qualit and productivity benefits. The Fabricator* 66–69
- [39] Hering AG (2016) Hering with chocolate. TigSpeed – save up to 50% with the TIG wire feeder from EWM. In: *EWM Customer Story*. https://products.ewm-group.com/images/referenzen/dokumente/PraxisReport_Hering_4seitig_EN_12_2016.pdf. Accessed 25 Aug 2024
- [40] EWM (2018) TigSpeed TIG cold/hot wire welding [Brochure]
- [41] Fronius (2022) Dynamic wire - TIG cold wire welding [Brochure]
- [42] Willinger WM (2024) WIG-Schweissen mit dynamisch geregelter Drahtvorschubgeschwindigkeit. In: *Sondertagung Schwaissen im Anlagen und Behälterbau*. Munich
- [43] Silwal B, Santangelo M (2016) VIBRATION ASSISTED HOT-WIRE GAS-TUNGSTEN ARC WELDING OF DUPLEX STAINLESS STEEL 2205
- [44] TipTIG TipTIG - The evolution of TIG welding [Brochure]
- [45] Jorge VL, Santos CHA, Scotti FM, Larquer TR, Mota CP, Reis RP, Scotti A (2018) Development and evaluation of wire feeding pulsing techniques for arc welding. *Soldagem e Inspecao* 23:326–339. <https://doi.org/10.1590/0104-9224/SI2303.03>
- [46] Silva RHG, Paes LE dos S, Okuyama MP, de Sousa GL, Viviani AB, Cirino LM, Schwedersky MB (2018) TIG welding process with dynamic feeding: a characterization approach. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 96:4467–4475. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-1929-6>
- [47] Opderbecke T, Guiheux S (2009) TOPTIG: robotic TIG welding with integrated wire feeder. *Welding International* 23:523–529. <https://doi.org/10.1080/09507110802543146>
- [48] Rodriguez N, Vázquez L, Huarte I, Arruti E, Tabernero I, Alvarez P (2018) Wire and arc additive manufacturing: a comparison between CMT and TopTIG processes applied to stainless steel. *Welding in the World* 62:1083–1096. <https://doi.org/10.1007/s40194-018-0606-6>

- [49] Wu Q, Lu J, Liu C, Shi X, Ma Q, Tang S, Fan H, Ma S (2017) Obtaining uniform deposition with variable wire feeding direction during wire-feed additive manufacturing. *Materials and Manufacturing Processes* 32:1881–1886. <https://doi.org/10.1080/10426914.2017.1364860>
- [50] Syed WUH, Li L (2005) Effects of wire feeding direction and location in multiple layer diode laser direct metal deposition. *Appl Surf Sci* 248:518–524. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2005.03.039>
- [51] Fortain J-M, Rimano L, Vidya. Viwek (2008) TOPTIG Innovative Process Improves Welding of Sheet Metal Parts. Fortain. *WeldingJournal* 01–08
- [52] Hirota Y (2011) New technology of the arc welding. *Welding International* 25:945–951. <https://doi.org/10.1080/09507116.2011.590660>
- [53] Silva RHG e, Schwedersky MB, Rosa ÁF da (2020) Evaluation of TopTIG technology applied to robotic orbital welding of 304L pipes. *International Journal of Pressure Vessels and Piping* 188:104229. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2020.104229>
- [54] Fortain JM, Guiheux S, Opderbecke T (2013) Thin-sheet metal welding. *Welding International* 27:30–36. <https://doi.org/10.1080/09507116.2011.600022>
- [55] Kawabata M, Sasaki T, Wada K, Kanemaru S, Nomura Y, Sasahara H (2024) Welding torch with coaxial wire feed and rotating electrode for wire-arc directed energy deposition. *Addit Manuf* 84:104106. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2024.104106>
- [56] Wang X, Wang A, Li Y (2020) Study on the deposition accuracy of omnidirectional GTAW-based additive manufacturing. *J Mater Process Technol* 282:. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.116649>
- [57] Kapil S, Kulkarni P, Joshi P, Negi S, Karunakaran KP (2019) Retrofitment of a CNC machine for omnidirectional tungsten inert gas cladding. *Virtual Phys Prototyp* 14:293–306. <https://doi.org/10.1080/17452759.2018.1552484>
- [58] Rosa AF da, Direne Filho H, Dalpiaz G, Schwedersky MB, Silva RH gonçalves e silva (2018) Estudo dos Limites Operacionais do Processo TIG Semiautomático com Variação do Ângulo de Injeção de Material (alimentação de arame) Viabilizada por um Bocal Especial. XXXVIII Consolda - Congresso Nacional de Soldagem
- [59] Jorge VL, Santos CHA, Scotti FM, Larquer TR, Mota CP, Reis RP, Scotti A (2018) Desenvolvimento e Avaliação de Técnicas para Pulsação da

- Alimentação de Arame em Soldagem a Arco. *Soldagem & Inspeção* 23:326–339. <https://doi.org/10.1590/0104-9224/si2303.03>
- [60] Riffel KC, e Silva RHG, Haupt W, da Silva LE, Dalpiaz G (2020) Effect of dynamic wire in the GTAW process: Microstructure and corrosion resistance. *J Mater Process Technol* 285:116758. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.116758>
- [61] Da Cunha TV, dos Santos FJ, Voigt AL (2022) 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* 44:292. <https://doi.org/10.1007/s40430-022-03582-z>
- [62] Pigozzo IO, Silva regis HG e S, Viviani A bonamigo, Meurer G (2024) Comparison of hot-wire and cold-wire GTAW with dynamic wire feeding of Inconel 625 deposits for cladding applications. In: *Proceedings of the ROG*. Rio de Janeiro
- [63] Rosa AF, Lemos VIB, Batista F, Silva RHG (2021) CARACTERIZAÇÃO E ANÁLISE DA SOLDAGEM PLASMA COM ALIMENTAÇÃO DINÂMICA DE ARAME. In: *11º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação*. Curitiba
- [64] das Neves N, Fernandes MF, Von Dollinger CF de A, Assis JMK, Voorwald HJC (2022) Effects of GTAW Dynamic Wire Feeding Frequencies on Fatigue Strength of ASTM A516-70 Steel Welded Joints. *J Mater Eng Perform* 31:6435–6450. <https://doi.org/10.1007/s11665-022-06868-4>
- [65] Silva RHG e (2005) Soldagem MIG/MAG em transferência metálica por curto circuito controlado aplicado ao passe de raiz. *Dissertação de mestrado*, Universidade Federal de santa Catarina
- [66] Taguchi H, Haneda M, Imanaga S, Sejima I (1979) Characteristics of plasma arc welding with arc wire addition (report 2). *Journal of the Japan Welding Society* 48:1065–1069. <https://doi.org/10.2207/qjjws1943.48.1065>
- [67] Taguchi H, Haneda M, Imanaga S, Sejima I (1979) Metal transfer in plasma arc - Plasma arc welding with filler wire addition (report 1). *Journal of the Japan Welding Society* 48:488–493. <https://doi.org/10.2207/qjjws1943.48.488>
- [68] Ríos S, Colegrove PA, Williams SW (2019) Metal transfer modes in plasma Wire + Arc additive manufacture. *J Mater Process Technol* 264:45–54. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.08.043>
- [69] Yudodibroto BYB, Hermans MJM, Hirata Y, den Ouden G (2004) Influence of filler wire addition on weld pool oscillation during gas tungsten arc welding.

- Science and Technology of Welding and Joining 9:163–168. <https://doi.org/10.1179/136217104225012274>
- [70] Park D, Cho J, Park Y (2023) A Study on the Change of Wire Feeding Speed in GTA Welding (I) - Changes in the Modes of Metal Transfer -. Journal of Welding and Joining 41:202–206. <https://doi.org/10.5781/JWJ.2023.41.3.9>
- [71] Kutelu BJ, Seidu SO, Eghabor GI, Ibitoye AI (2018) Review of GTAW Welding Parameters. Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering 06:541–554. <https://doi.org/10.4236/jmmce.2018.65039>
- [72] Pigozzo IO, Gonçalves e Silva RH, Wallerstein D (2022) On Orbital GTA Root-Pass Welding: Evaluation of AVC Performance, Bevel Geometry Influence and Wire Feed Technique. Soldagem & Inspeção 27:. <https://doi.org/10.1590/0104-9224/si27.12>
- [73] Jia A, Luo Y, Hong B, Li X, Yin L, Luo M (2024) A Real-Time Monitoring Method for Droplet Transfer Frequency in Wire-Filled GTAW Based on Arc Sensing. Sensors 24:1924. <https://doi.org/10.3390/s24061924>
- [74] Silva RGN (2016) Caracterização do processo de soldagem TIG com alimentação de arame dinâmica em alta frequência. Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal de santa Catarina
- [75] Jun JH, Park JH, Cheepu M, Cho SM (2020) Observation and analysis of metal transfer phenomena for high-current super-TIG welding process. Science and Technology of Welding and Joining 25:106–111. <https://doi.org/10.1080/13621718.2019.1637172>
- [76] Hagqvist P, Heralić A, Christiansson A-K, Lennartson B (2014) Resistance measurements for control of laser metal wire deposition. Opt Lasers Eng 54:62–67. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2013.10.010>
- [77] Galeazzi D (2024) CMT - Galeazzi
- [78] Dornelles JM (2022) Análise da influência da frequência de alimentação dinâmica de arame na soldagem com processo plasma da aço inoxidável 309L aplicada à manufatura aditiva. Florianópolis
- [79] El-Askary WA, Balabel AA, Balabel A, Wilson S (2013) Numerical and Experimental Investigations of Jet Impingement on a Periodically Oscillating-Heated Flat Plate

- [80] Fanara C, Vilarinho L (2004) Electrical characterization of atmospheric pressure arc plasmas. *Eur Phys J D At Mol Opt Phys* 28:241–251. <https://doi.org/10.1140/epjd/e2003-00301-8>
- [81] Kou sindo (2003) WELDING METALLURGY SECOND EDITION. Hoboken, New Jersey
- [82] Lippold JC (2015) Welding Metallurgy and Weldability. Hoboken, New Jersey
- [83] Pearce BP, Kerr HW (1981) Grain refinement in magnetically stirred GTA welds of aluminum alloys. *Metallurgical Transactions B* 12:479–486. <https://doi.org/10.1007/BF02654317>
- [84] Dutra JC (2023) Processo de Soldagem TIG. In: *Ciência e tecnologia da soldagem a arco voltaico: dos fundamentos às modernas técnicas*, 1st ed. Alfa Centauri, Florianópolis, p 107
- [85] Marques PV, Modenesi PJ, Bracarense AQ (2005) O arco elétrico de soldagem. In: *Soldagem: Fundamentos e tecnologia*, 1st ed. Editora UFSM, Belo Horizonte, p 54
- [86] da Cunha TV, Bohórquez CEN (2021) Effects of current pulsation at ultra-high frequency on physical aspects of the arc and its implications in the weld bead morphology in the GTAW process. *Welding in the World* 65:251–261. <https://doi.org/10.1007/s40194-020-01016-9>
- [87] Dutra JC, Riffel KC, Silva RHG e, Ramirez AJ (2023) A Contribution to the Analysis of the Effects of Pulsed Current in GTAW Welding of 1-mm-Thick AISI 304 Sheets. *Metals (Basel)* 13:1387. <https://doi.org/10.3390/met13081387>
- [88] Ortiz A, García A, Cadenas M, Fernández MR, Cuetos JM (2017) WC particles distribution model in the cross-section of laser clad NiCrBSi + WC coatings, for different wt% WC. *Surf Coat Technol* 324:298–306. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.05.086>
- [89] Xiao Q, Sun W lei, Yang K xin, Xing X feng, Chen Z hao, Zhou H nan, Lu J (2021) Wear mechanisms and micro-evaluation on WC particles investigation of WC-Fe composite coatings fabricated by laser cladding. *Surf Coat Technol* 420:.. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127341>
- [90] Fan L, Dong Y, Chen H, Dong L, Yin Y (2019) Wear Properties of Plasma Transferred Arc Fe-based Coatings Reinforced by Spherical WC Particles. *Journal Wuhan University of Technology, Materials Science Edition* 34:433–439. <https://doi.org/10.1007/s11595-019-2070-6>

- [91] Wu P, Du HM, Chen XL, Li ZQ, Bai HL, Jiang EY (2004) Influence of WC particle behavior on the wear resistance properties of Ni-WC composite coatings. *Wear* 257:142–147. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2003.10.019>
- [92] Van Acker K, Vanhoyweghen D, Persoons R, Vangrunderbeek J (2005) Influence of tungsten carbide particle size and distribution on the wear resistance of laser clad WC/Ni coatings. In: *Wear*. pp 194–202
- [93] Fernández MR, García A, Cuetos JM, González R, Noriega A, Cadenas M (2015) Effect of actual WC content on the reciprocating wear of a laser cladding NiCrBSi alloy reinforced with WC. *Wear* 324–325:80–89. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2014.12.021>
- [94] Xu JS, Zhang XC, Xuan FZ, Wang ZD, Tu ST (2012) Microstructure and sliding wear resistance of laser clad WC/Ni composite coatings with different contents of WC particle. *J Mater Eng Perform* 21:1904–1911. <https://doi.org/10.1007/s11665-011-0109-8>
- [95] García A, Fernández MR, Cuetos JM, González R, Ortiz A, Cadenas M (2016) Study of the Sliding Wear and Friction Behavior of WC + NiCrBSi Laser Cladding Coatings as a Function of Actual Concentration of WC Reinforcement Particles in Ball-on-Disk Test. *Tribol Lett* 63:. <https://doi.org/10.1007/s11249-016-0734-3>
- [96] Yuan J, Huang Y, Wang L, Jia C, Zhang F, Yang L (2023) Effect of the dissolution characteristic of tungsten carbide particles on microstructure and properties of Ni-WC/W₂C reinforcement coating manufactured by TIG cladding. *Int J Refract Metals Hard Mater* 110:. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2022.106047>
- [97] Wang Y, Huang Y, Yang L, Sun T (2021) Microstructure and property of tungsten carbide particulate reinforced wear resistant coating by TIG cladding. *Int J Refract Metals Hard Mater* 100:. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2021.105598>