



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E CIÊNCIAS MECÂNICAS

Felipe José dos Santos

**Concepção, caracterização e aplicação de tecnologia para oscilação longitudinal do
arame no processo de soldagem TIG**

Joinville

2021

Felipe José dos Santos

**Concepção, caracterização e aplicação de tecnologia para oscilação longitudinal do
arame no processo de soldagem TIG**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de mestre em Engenharia e Ciências Mecânicas.

Orientador: Prof. Tiago Vieira da Cunha, Dr.

Joinville

2021

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

dos Santos, Felipe José

Concepção, caracterização e aplicação de tecnologia para oscilação longitudinal do arame no processo de soldagem TIG / Felipe José dos Santos ; orientador, Tiago Vieira da Cunha, 2021.

155 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Joinville, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas, Joinville, 2021.

Inclui referências.

1. Engenharia e Ciências Mecânicas. 2. GTAW. 3. Oscilação longitudinal do arame de adição. 4. Condições operacionais de transferência metálica à poça de fusão. 5. Morfologia do cordão de solda. I. da Cunha, Tiago Vieira. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas. III. Título.

Felipe José dos Santos

Concepção, caracterização e aplicação de tecnologia para oscilação longitudinal do arame no processo de soldagem TIG

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

Prof. Américo Scotti, Dr.

University West (Production Technology West, Trollhattan, Sweden)

Prof. Gabriel Benedet Dutra, Dr.

Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Régis Kovacs Scalice, Dr.

Universidade Federal de Santa Catarina

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de mestre em Engenharia e Ciências Mecânicas.

Coordenação do Programa de Pós-Graduação

Prof. Tiago Vieira da Cunha, Dr.

Orientador

Joinville, 2021

Este trabalho é dedicado aos meus colegas de trabalho do Laboratório de Tecnologia da Soldagem (LTS), aos demais amigos, pais e familiares.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar à Deus, por ter me agraciado com saúde e força para superar as dificuldades com as quais me deparei durante a elaboração do atual estudo. À minha família, colegas de trabalho e demais amigos, pelo apoio.

À Universidade Federal de Santa Catarina, pela formação de qualidade e gratuita. Ainda, ao seu corpo docente, direção e administração. À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela bolsa de estudos.

Ao professor e orientador Tiago Vieira da Cunha, pelo suporte no desenvolvimento deste estudo e pelas correções e incentivos. Por todo o auxílio prestado, pelo conhecimento dividido dentro do Laboratório de Tecnologia da Soldagem (LTS), pelas conversas e elucidações acerca dos fenômenos observados nos resultados do estudo.

Aos colegas de trabalho do LTS Arthur Czech, Gabriel Ferreira de Souza e Ricardo Campagnin, cujo apoio técnico foi primordial para a concepção do dispositivo utilizado nesse trabalho.

RESUMO

Apesar de não ser substancial no processo de soldagem TIG, a adição de material pode ser de íntimo interesse em determinadas aplicações. Na soldagem de juntas em “T” para que não ocorram descontinuidades do tipo mordedura, no preenchimento de chanfros e na soldagem em passe único de chapas com espessura superior a 3 mm, a adição de material torna-se indispensável. No caso da soldagem TIG mecanizada, segundo a literatura, a oscilação longitudinal do arame durante a adição de material apresenta vantagens em relação a alimentação convencional, como o aumento da janela operacional de processo e da produtividade. A literatura aponta que a aplicação da oscilação longitudinal do arame resulta em alterações morfológicas dos cordões de solda, mas pouco aborda sobre questões metalúrgicas. Ademais, uma série de estudos que abordam as alterações morfológicas e possuem conclusões díspares entre si são encontrados na literatura. Neste contexto, o TIP TIG é a tecnologia atualmente mais empregada para promover a oscilação longitudinal do arame no processo de soldagem TIG. O desenvolvimento de novas tecnologias para o mesmo fim tem sido alvo de diversos estudos nos últimos anos, sendo que muitos desses desenvolvimentos são fomentados por limitações percebidas do TIP TIG. Nesse contexto, o atual estudo propõe apresentar a concepção de um dispositivo, desenvolvido no LTS, para promover a oscilação longitudinal do arame no processo de soldagem TIG, além da sua caracterização e aplicação em ensaios de soldagem. A avaliação das características geométricas dos cordões de solda, bem como a avaliação metalúrgica também se apresentam como propostas deste estudo. Para tanto, a concepção do dispositivo foi realizada baseando-se em uma primeira versão de dispositivo desenvolvido pelo Laboratório de Tecnologia da Soldagem (LTS), cujo princípio de funcionamento já era consolidado. No que tange os ensaios de soldagem, 30 cordões de solda foram realizados, 10 em cada condição operacional adotada: transferência intermitente, ponte contínua e arame enterrado. Para cada condição operacional, um ensaio de referência na condição de alimentação contínua foi realizado, além de ensaios variando a amplitude (2, 5 e 8 mm) e frequência (2, 10 e 18 Hz) de oscilação do arame. Três amostras foram extraídas por cordão de solda e submetidas a macroscopia, sendo uma delas submetida a microscopia. Todos os ensaios de soldagem realizados no atual estudo apresentaram estabilidade, mediante análise da variação da tensão do arco. Ainda, este estudo revela que a condição operacional tem influência significativa na morfologia dos cordões de solda, sendo que a condição de transferência intermitente foi aquela que apresentou a maior penetração quando são comparadas as amostras de referência. Nessa condição operacional, quando a oscilação longitudinal do arame é empregada, observou-se a tendência de queda na penetração em comparação à amostra de referência (até 28%). Por outro lado, para a condição operacional de arame enterrado, a tendência é de aumento da penetração (até 80%). A condição operacional de ponte contínua também apresentou a tendência de aumento na penetração com a oscilação longitudinal do arame (até 86%). Além da penetração, que mostrou os efeitos mais evidentes, o reforço, largura e diluição dos cordões de solda também foram influenciados pela oscilação longitudinal do arame, sendo que a área fundida se mostrou como a única característica geométrica que não sofreu influência. A oscilação longitudinal do arame resultou em descontinuidades do tipo poros para as condições operacionais de arame enterrado e ponte contínua, não apresentando efeitos metalúrgicos para nenhuma das condições operacionais adotadas.

Palavras-chave: GTAW. Oscilação longitudinal. Condição operacional. Morfologia do cordão de solda. Porosidades.

ABSTRACT

Although not substantial in the TIG welding process, the addition of material may be particularly interesting in certain applications. The weld of “T” joints so that there are no undercutting discontinuities, the filling of chamfered joints and the weld in single-pass of sheets with thickness greater than 3 mm are examples of applications where the addition of material becomes indispensable. In the case of mechanized TIG welding, according to the literature, dynamic wire feeding as a technique to promote the addition of material has advantages over conventional feeding, such as increasing the process window and productivity. The literature points out that the application of dynamic wire feed results in morphological changes in the weld beads, but little is discussed about metallurgical or microstructural influences. In addition, a series of studies related to morphological changes that have different conclusions are found in the literature. TIP TIG is the technology currently most used to promote the dynamic feeding of the wire in the TIG welding process. The development of new technologies for the same purpose has been the subject of several studies in recent years, and many of these developments are encouraged by limitations of TIP TIG. In this context, the current study proposes the conception of a device to promote the dynamic wire feeding in the TIG welding process, in addition to its characterization and application in welding tests. The evaluation of the geometric characteristics of the weld beads, as well as metallurgical evaluations are also proposed in this study. For such a purpose, the device was conceived based on a first version of device developed by the Welding Technology Laboratory, whose operating principle was already consolidated. Regarding the welding tests, 30 weld beads were performed, 10 in each operational condition adopted: intermittent transfer, continuous bridge and buried wire. For each operational condition, a reference test (continuous feed condition) was carried out, in addition to tests varying the amplitude (2, 5 and 8 mm) and frequency (2, 10 and 18 Hz) of the wire oscillation. Three samples were extracted of each weld bead and subjected to macroscopy, one of which was submitted to microscopy. All welding tests performed in the current study showed stability, by analyzing the variation in arc voltage. Still, this study reveals that the operational condition has significant influence on the weld bead morphology, and the condition of intermittent transfer was the one that presented the highest penetration when compared to the reference sample. In such operational condition, when dynamic wire feeding is applied, a drop tendency in penetration was observed in comparison to the reference sample (up to 28%). On the other hand, for the operational condition of buried wire, the tendency is for an increase in penetration (up to 80%). The operational condition of continuous bridge also showed a tendency to increase penetration with dynamic wire feeding (up to 86%). In addition to penetration, which showed the most evident effects, the reinforcement, width and dilution of the weld beads were also influenced by the dynamic wire feed. The molten area was the only geometric characteristic not influenced. The dynamic feeding of the wire resulted in porosity discontinuities for the operational conditions of buried wire and continuous bridge, and no metallurgical effects for any of the operational conditions adopted.

Keywords: GTAW. Longitudinal oscillation. Operational condition. Weld bead morphology. Porosities.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tipos de transferência metálica na alimentação de arame mecanizada no processo TIG. Em (a) transferência por fusão intermitente do arame, (b) transferência em ponte contínua, (c) transferência intermitente, (d) transferência por voo livre.....	22
Figura 2 - Cordões produzidos com diferentes variações da posição de alimentação do arame (Δh) em relação a uma referência pré-estabelecida (h). Em (a) Esquemático, (b) $\Delta h = 0$ mm, (c) $\Delta h = 0,5$ mm, (d) $\Delta h = 1,0$ mm.	23
Figura 3 - Tipos de transferência metálica na alimentação de arame mecanizada no processo TIG e sua relação com a geometria da poça de fusão. Em (a) transferência em ponte contínua, (b) transferência intermitente, (c) transferência por voo livre.....	24
Figura 4 - Influência do diâmetro (\varnothing_w) e da velocidade de alimentação do arame (u_w) no tipo de transferência metálica e na taxa de deposição obtidos no processo TIG.....	25
Figura 5 - Influência da posição de alimentação do arame na taxa de deposição (V_w) obtida no processo TIG (transferência em ponte contínua).....	26
Figura 6 - Exemplo de setup de equipamento para soldagem CMT no caso da soldagem robotizada. Em (1) fonte de soldagem, (2) painel de controle da fonte, (3) unidade de refrigeração, (4) controle do robô, (5) alimentador contínuo de arame, (6) tracionador com elevada resposta dinâmica, (7) buffer, (8) bobina de arame.....	27
Figura 7 - Formas de onda da corrente de soldagem e tensão do arco no CMT.	28
Figura 8 - Posicionamento do arame suplementar junto a tocha MIG/MAG.....	29
Figura 9 - Base móvel que promove a movimentação oscilatória do conjunto tracionador no TIP TIG.	31
Figura 10 – Funcionamento da técnica de oscilação longitudinal do arame “pulmão ativo”. .	34
Figura 11 – Dispositivos utilizados para avaliar a técnica “pulmão ativo” com diferentes formas de acionamento da oscilação transversal. Em (a) acionamento eletromecânico e em (b) acionamento eletromagnético.....	35
Figura 12 – Protótipos para a oscilação longitudinal do arame com transmissão diferencial de velocidades. Em (a) protótipo com motores CC de escovas, (b) protótipo com motores de passo.	37
Figura 13 – Destacamento da gota de metal fundido. Em (a-e) alimentação contínua do arame, (f-j) oscilação longitudinal do arame, (k-o) contaminação do eletrodo durante soldagem com alimentação contínua do arame.	38

Figura 14 – Comparação entre a face dos cordões. Em (a) sem alimentação de arame, (b) com alimentação contínua do arame, (c) com oscilação longitudinal do arame: 1 Hz, (d) com oscilação longitudinal do arame: 2 Hz.	40
Figura 15 – Comparação entre seções longitudinais dos cordões. Em (a) sem alimentação de arame, (b) com alimentação contínua do arame, (c) com oscilação longitudinal do arame: 1 Hz, (d) com oscilação longitudinal do arame: 2 Hz.	40
Figura 16 – Comparação entre seções transversais dos cordões. Em (a) sem alimentação de arame, (b) com alimentação contínua do arame, (c) com oscilação longitudinal do arame: 1 Hz, (d) com oscilação longitudinal do arame: 2 Hz.	41
Figura 17 - Comparação da face e seção transversal dos cordões. Em (a) alimentação contínua do arame, (b) oscilação longitudinal do arame.	41
Figura 18 – Comparação da fusão do metal na ponta do arame. Em (a) alimentação contínua do arame, (b) oscilação longitudinal do arame.	42
Figura 19 – Oscilogramas de corrente de soldagem e tensão do arco. Em (a) alimentação contínua do arame, (b) utilizando a técnica de “pulmão ativo” com acionamento eletromecânico.	43
Figura 20 – Aspecto superficial e da seção transversal das soldas produzidas com e sem oscilação longitudinal do arame utilizando a técnica de “pulmão ativo” com acionamento eletromecânico.	44
Figura 21 – Faces e macrografias das seções transversais de cordões obtidos com e sem oscilação longitudinal do arame e com alimentação à frente e atrás da tocha TIG. Em (a) alimentação contínua atrás da tocha, (b) alimentação contínua à frente da tocha, (c) oscilação longitudinal atrás da tocha, (d) oscilação longitudinal à frente da tocha.	45
Figura 22 – Aspecto superficial e da seção transversal das soldas produzidas com e sem oscilação longitudinal do arame para a corrente de soldagem de 250 A.	46
Figura 23 – Micrografias obtidas por MEV (Microscopia Eletrônica de Varredura) da seção transversal dos corpos de prova.	47
Figura 24 – Macrografias e faces dos cordões produzidos com diferentes velocidades de alimentação do arame na condição de alimentação contínua e com oscilação longitudinal (amplitude de oscilação de 5 mm e frequência de 20 Hz).	49
Figura 25 – Macrografias e faces dos cordões produzidos com diferentes frequências de oscilação do arame (amplitude de oscilação de 5 mm).	50
Figura 26 – Primeiro protótipo de dispositivo para a oscilação longitudinal do arame no processo TIG desenvolvido no LTS.	52

Figura 27 – Interação entre campos magnéticos do ímã permanente e da bobina e força resultante na bobina.....	53
Figura 28 – Função de transferência utilizada para descrever a posição do conjunto móvel do protótipo no tempo.	54
Figura 29 – Investigação realizada a fim de identificar a frequência limite de funcionamento para cada amplitude. Em (a) análise para a amplitude de oscilação de 10 mm, (b) relação entre amplitude e frequência limite para todas as amplitudes.....	55
Figura 30 – Gráficos que descrevem o movimento de avanço e retorno do dispositivo para a amplitude de 8 mm e frequência de 3 Hz obtidos.	56
Figura 31 – Detalhamento mecânico do dispositivo proposto e comparação com o dispositivo construído. Em (a) dispositivo projetado, (b) dispositivo construído.....	59
Figura 32 – Aumento instantâneo do comprimento de conduíte percorrido pelo arame e variação da posição da ponta do arame. Onde “A” significa “amplitude de oscilação”.....	60
Figura 33 – Representação da variação da distância entre a ponta do arame e a poça de fusão no modo de funcionamento controlado. Em (a) configuração com o arame enterrado na poça, (b) configuração com o arame fora da poça.	63
Figura 34 – Fluxograma dos modos de operação do dispositivo concebido.	64
Figura 35 – Diagrama de blocos da versão final do dispositivo.....	66
Figura 36 – Bancada utilizada para a calibração inicial do dispositivo.....	68
Figura 37 – Interface do software PFA utilizada nos ensaios de calibração.	69
Figura 38 – Bancada utilizada para a calibração final do dispositivo.	70
Figura 39 – Relação entre a tensão fornecida pelo microcontrolador e a amplitude de oscilação.	70
Figura 40 – Relação entre variáveis medidas e reguladas: deslocamento no avanço (a), deslocamento no recuo (b), amplitude de oscilação (c), frequência de oscilação (d).	71
Figura 41 - Interface do software PFA durante ensaios de caracterização do deslocamento da ponta do arame. Em (a) velocidade de alimentação nula, (b) velocidade de alimentação igual a 2 m/min.....	73
Figura 42 – Bancada de ensaios empregada nos ensaios de soldagem.	74
Figura 43 – Posicionamento da tocha e bico direcionador do arame de adição.....	75
Figura 44 – Posição dos cortes transversais para retiradas de amostras (dimensões em milímetros).	77
Figura 45 – Regiões de obtenção das micrografias.	77
Figura 46 – Ficha Técnica do Ensaio TI00.	78

Figura 47 – Curvas de deslocamento obtidas para a condição de dispositivo livre nas amplitudes de oscilação de 1 a 10 mm, em intervalos de 1 mm, e frequência de oscilação de 15 Hz.	79
Figura 48 – Curvas de deslocamento, velocidade e aceleração (dispositivo livre) que representam os movimentos de avanço e recuo do conjunto fixador nas amplitudes de oscilação de 2 a 10 mm, em intervalos de 2 mm, e frequência de oscilação de 15 Hz.	81
Figura 49 – Curvas de deslocamento do conjunto fixador para a condição de dispositivo livre nas frequências de oscilação de 5 a 30 Hz em intervalos de 5 Hz e amplitude de oscilação de 5 mm.	83
Figura 50 – Curvas de deslocamento (dispositivo livre) do conjunto fixador no avanço e recuo nas frequências de oscilação de 5 a 30 Hz, em intervalos de 5 Hz e amplitude de oscilação de 5 mm (escala de tempo fixa).	84
Figura 51 – Comparação entre as curvas de deslocamento para a condição de dispositivo livre e com arame em seu interior (frequência de oscilação de 15 Hz e amplitudes de oscilação de 2 a 10 mm, em intervalos de 2 mm).	86
Figura 52 – Curvas de deslocamento da ponta do arame para a condição de V_a nula e $V_a = 2$ m/min (frequência de oscilação de 15 Hz e amplitudes de oscilação de 2 a 10 mm, em intervalos de 2 mm).	88
Figura 53 – Cliclogramas da tensão do arco e corrente de soldagem das amostras de referência (alimentação contínua, TI00, PC00 E AE00) e das respectivas amostras com maior amplitude e frequência de oscilação (TI188, PC188, AE188).	90
Figura 54 – Face dos cordões de solda obtidos na condição operacional de transferência intermitente.	92
Figura 55 – Face dos cordões de solda obtidos na condição operacional de ponte contínua. ...	93
Figura 56 – Faces dos cordões obtidos na condição operacional de arame enterrado.	94
Figura 57 – Ensaio realizado com oscilação longitudinal do arame nos quais foram observadas descontinuidades do tipo porosidade.	95
Figura 58 – Macrografias da seção transversal de cordões de solda das amostras obtidas na condição de arame enterrado com a presença de porosidades.	97
Figura 59 – Macrografias que evidenciam as porosidades das amostras obtidas na condição de ponte contínua.	98
Figura 60 – Macrografias das seções transversais dos cordões associados as amostras de referência.	99
Figura 61 – Penetração em função da condição operacional, frequência e amplitude de oscilação longitudinal do arame.	103

Figura 62 – Macrografias das seções transversais das amostras obtidas na condição operacional de transferência intermitente.	104
Figura 63 – Macrografias das seções transversais das amostras obtidas na condição operacional de arame enterrado.	106
Figura 64 – Macrografias das seções transversais das amostras obtidas na condição operacional de ponte contínua.	108
Figura 65 – Reforço em função da condição operacional, frequência e amplitude de oscilação longitudinal do arame.	112
Figura 66 – Largura em função da condição operacional, frequência e amplitude de oscilação longitudinal do arame.	113
Figura 67 – Área fundida em função da condição operacional, frequência e amplitude de oscilação longitudinal do arame.	115
Figura 68 – Diluição em função da condição operacional, frequência e amplitude de oscilação longitudinal do arame.	116
Figura 69 – Representação polar do efeito da oscilação longitudinal do arame nas características geométricas da ZF.	118
Figura 70 – Micrografias da região central da ZF (ampliação de 40x) das amostras obtidas na condição de referência.	121
Figura 71 – Micrografias da região da raiz da ZF (ampliação de 40x) das amostras obtidas na condição de referência.	122
Figura 72 – Micrografias da região da margem do cordão (ampliação de 40x) das amostras obtidas na condição de referência.	124
Figura 73 – Micrografias das amostras obtidas na condição operacional de transferência intermitente (amplitude de oscilação de 5 mm e referência).	125
Figura 74 – Micrografias das amostras obtidas na condição operacional de ponte contínua (amplitude de oscilação de 5 mm e referência).	126
Figura 75 – Micrografias das amostras obtidas na condição operacional de arame enterrado (amplitude de oscilação de 5 mm e referência).	127

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Relação de equações derivadas das funções de posição em função do tempo obtidas(equações de velocidade e constantes de aceleração).....	56
Tabela 2 – Parâmetros do processo de soldagem comuns a todos os ensaios.....	75
Tabela 3 – Nomenclatura dos ensaios realizados e variação de parâmetros da oscilação longitudinal e condições operacionais.....	76

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A_a – Amplitude de avanço [mm]

A_r – Amplitude de recuo [mm]

AE – Condição operacional de Arame Enterrado

CMT – Cold Metal Transfer

DEP – Distância Eletrodo Peça [mm]

GTAW – Gas-shielded Tungsten Arc Welding

I_m – Corrente média [A]

IHM – Interface Homem Máquina

LTS – Laboratório de Tecnologia da Soldagem

MIG/MAG – Metal Inert Gas/Metal Active Gas

P1, P2, P3 – Patamares 1, 2 e 3 de deslocamentos alcançados durante o tempo de permanência do dispositivo no avanço ou recuo

Pe – Número de Peclet [-]

PC – Condição operacional de Ponte Contínua

t_a – Tempo no avanço [s]

t_r – Tempo no recuo [s]

TI – Condição operacional de Transferência Intermitente

TIG – Tungsten Inert Gas

V_A – Velocidade de Alimentação do arame [m/min]

WTS – Wire Traction System

ZAC – Zona Afetada pelo Calor

ZF – Zona de Fusão

ZTA – Zona Termicamente Afetada

θ_M – Ângulo de molhamento [graus]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	OBJETIVOS	19
1.1.1	Objetivo Geral.....	19
1.1.2	Objetivos Específicos	19
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1	ADIÇÃO DE MATERIAL NO PROCESSO DE SOLDAGEM TIG	20
2.2	OSCILAÇÃO LONGITUDINAL DO MATERIAL DE ADIÇÃO.....	26
2.2.1	Oscilação longitudinal do arame no processo TIG.....	30
2.2.2	Tecnologias para a oscilação longitudinal do arame no processo TIG.....	33
2.2.3	Efeitos da oscilação longitudinal do arame na soldagem TIG.....	37
3	HISTÓRICO DO DESENVOLVIMENTO DA OSCILAÇÃO LONGITUDINAL DE ARAME APLICADA AO PROCESSO DE SOLDAGEM TIG NO LTS	51
3.1	PRIMEIRO PROTÓTIPO DE DISPOSITIVO DESENVOLVIDO NO LTS	51
3.2	CONCEPÇÃO DA VERSÃO FINAL DO DISPOSITIVO	57
3.2.1	Modos de operação	61
3.2.2	Hardware.....	65
4	MATERIAIS E MÉTODOS	67
4.1	CALIBRAÇÃO DO DISPOSITIVO	67
4.2	CARACTERIZAÇÃO DO DISPOSITIVO	72
4.3	ENSAIOS DE SOLDAGEM.....	73
4.4	CARACTERIZAÇÃO DOS CORDÕES DE SOLDA	76
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	79
5.1	CARACTERIZAÇÃO DO DISPOSITIVO	79
5.2	ENSAIOS DE SOLDAGEM.....	89
5.2.1	Efeito da oscilação longitudinal do arame na estabilidade do processo	89
5.2.2	Avaliação inicial da face dos cordões.....	91

5.2.3	Efeito da oscilação longitudinal do arame no tocante a porosidade	95
5.2.4	Efeito da oscilação longitudinal do arame sobre as características geométricas da zona de fusão	99
5.2.4.1	<i>Efeito da condição operacional.....</i>	99
5.2.4.2	<i>Efeito da oscilação longitudinal do arame na penetração dos cordões</i>	102
5.2.4.3	<i>Efeito da oscilação longitudinal do arame no reforço dos cordões.....</i>	111
5.2.4.4	<i>Efeito da oscilação longitudinal do arame na largura dos cordões</i>	113
5.2.4.5	<i>Efeito da oscilação longitudinal do arame na área fundida</i>	114
5.2.4.6	<i>Efeito da oscilação longitudinal do arame na diluição.....</i>	115
5.2.4.7	<i>Síntese do efeito da oscilação longitudinal do arame nas características geométricas da Zona Fundida.....</i>	117
5.2.5	Avaliação metalúrgica da zona de fusão.....	119
5.2.5.1	<i>Efeito da condição operacional.....</i>	119
5.2.5.2	<i>Efeito do emprego da oscilação longitudinal do arame.....</i>	124
6	CONCLUSÕES.....	129
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	130
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	131
	APÊNDICE A – Resumo dos efeitos da oscilação longitudinal do arame na soldagem TIG	135
	APÊNDICE B – Ficha técnica do ensaio TI00	137
	APÊNDICE C – Macrografias das seções transversais	138
	APÊNDICE D – Dados das medições realizadas nas imagens do Apêndice C	143
	APÊNDICE E – Micrografias	147
	ANEXO A – Certificado de inspeção da chapa de aço utilizada no estudo	155

1 INTRODUÇÃO

Desde a sua primeira patente, cerca de 80 anos atrás, o processo de soldagem TIG vem sendo utilizado para promover a união de materiais considerados de difícil soldabilidade, haja visto o próprio objetivo da sua criação: a soldagem de ligas de magnésio e alumínio. Também amplamente aplicado em soldagens de compromisso, sabe-se que os cordões de solda obtidos com esse processo são caracterizados por apresentar elevada qualidade superficial e altos índices de pureza, devido à estabilidade do arco voltaico, à utilização de gases de proteção inertes e à formação do arco voltaico a partir de um eletrodo não consumível. No entanto, uma série de estudos [1-3] afirmam que, de maneira geral, o processo TIG autógeno é desvantajoso em termos de produtividade quando comparado aos demais processos de soldagem a arco voltaico, principalmente àqueles de eletrodo consumível, apesar de já se estar estudando formas de mitigar esta constatação [3, 4].

A ciência relacionada à tecnologia da soldagem nos últimos anos tem se concentrado não na criação de novos processos, mas no desenvolvimento tecnológico daqueles que já existem, buscando suprir suas limitações e melhorar seus desempenhos. Com relação ao processo de soldagem TIG em seu aspecto de produtividade, percebe-se grande esforço por parte da comunidade científica no sentido de equiparar seu desempenho aos demais processos de soldagem a arco. As técnicas *Keyhole* e duplo eletrodo são exemplos de desenvolvimentos associados ao processo TIG nessa busca. Entende-se que a utilização da adição de material, que no processo TIG é facultativa, torna-se indispensável para que sejam atingidos os níveis de produtividade desejados. Além disso, sabe-se que em aplicações de juntas em “T” e juntas cuja preparação demanda a abertura de chanfros, a adição de material é imprescindível.

Com relação à adição de material no processo de soldagem TIG, restringindo a discussão à soldagem mecanizada ou automatizada, percebe-se que a oscilação longitudinal do arame está em voga e tem sido foco de inúmeros estudos nas últimas duas décadas. A oscilação longitudinal consiste em, além do movimento constante de avanço do arame, proporcionado pelo cabeçote tracionador, adicionar uma oscilação com determinada amplitude à ponta do arame durante a soldagem. Como resultado dessa oscilação durante a alimentação do arame, além da indicação de melhora nos índices produtivos por parte da literatura, uma maior janela operacional, bem como alterações morfológicas nos cordões de solda também são mencionados. Contudo, certas divergências são encontradas com relação aos resultados obtidos pela aplicação da oscilação longitudinal do arame, principalmente no que diz respeito à morfologia dos cordões de solda obtidos. Ainda, com exceção de apenas um trabalho recente

[5], não se encontra na literatura estudo algum relacionado a alterações metalúrgicas associadas a oscilação longitudinal do arame nesse processo.

Além da carência em termos de pesquisa mencionada, entende-se que a tecnologia utilizada para promover a oscilação longitudinal do arame nesse processo mais consolidada, comercialmente conhecida como TIP TIG, possui limitações que estimulam o desenvolvimento de novas tecnologias buscando o mesmo fim, porém, com evidentes melhorias. Encontram-se na literatura estudos associados ao desenvolvimento de protótipos e dispositivos com princípios inovadores para promover esta alimentação do arame com oscilação longitudinal no processo TIG, cada um com suas características [6-10]. Dessa forma, vislumbra-se uma lacuna científica e tecnológica no que diz respeito ao desenvolvimento de uma abordagem inédita, a fim de realizar a alimentação do arame no processo de soldagem TIG com oscilação longitudinal, fomentando o atual estudo.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem por objetivo principal realizar a caracterização de um dispositivo inovador desenvolvido pelo LTS e, de posse deste, investigar os efeitos de tal modo de alimentação de arame sobre os aspectos morfológicos e metalúrgicos dos cordões de solda.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Apresentar a concepção inovadora de dispositivo para a alimentação do arame com oscilação longitudinal no processo de soldagem TIG;
- Compreender o modo de funcionamento, o desempenho e as características operacionais do dispositivo concebido;
- Avaliar a estabilidade do arco voltaico sujeito a oscilação longitudinal do arame;
- Avaliar a sanidade dos cordões de solda realizados com a oscilação longitudinal do arame;
- Analisar o efeito das variáveis da oscilação longitudinal do arame nos aspectos morfológicos e metalúrgicos dos cordões de solda obtidos em diferentes condições operacionais.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ADIÇÃO DE MATERIAL NO PROCESSO DE SOLDAGEM TIG

O processo de soldagem *Tungsten Inert Gas* (TIG) ou *Gas-shielded Tungsten Arc Welding* (GTAW) foi patenteado na década de 40 por Russell Meredith, que buscava uma solução para a produção de soldas de qualidade em ligas de magnésio e alumínio aplicadas à indústria aeronáutica [11]. É caracterizado por ser um processo de união por fusão no qual a fonte de calor é proveniente de um arco voltaico que se estabelece entre a peça de trabalho e um eletrodo de tungstênio não consumível. Ainda, pelo fato de fazer uso de um eletrodo não consumível, propicia a soldagem de maneira autógena, ou seja, sem adição de material. Esse fato, aliado a utilização do gás de proteção inerte, confere ao processo a característica de produção de soldas com elevada pureza [12], já que interações que acarretariam em mudanças na composição química final dos cordões de solda são minimizadas. Esse processo de soldagem também é caracterizado por apresentar uma elevada estabilidade do arco voltaico [12]. Esta estabilidade está associada à emissão de elétrons por parte do eletrodo de tungstênio e a sua condição estática.

Apesar de propiciar a soldagem autógena, existem aplicações do processo de soldagem TIG que exigem a utilização da adição de material. Este é o caso da soldagem em passe único de juntas de topo compostas por chapas de espessura superior a 3 mm, por exemplo, como mostra o estudo de Lu, Qin e Dong [13]. Já no caso de juntas em “T”, a soldagem autógena usualmente causa descontinuidades do tipo mordedura (*undercutting*) [14], pois o metal que compõe a zona de fusão advém das regiões periféricas a junta. A soldagem de juntas com chanfro, nas quais se necessita do metal de adição para preenchê-lo, apresenta-se também como exemplo dessas aplicações. Além disso, a literatura [1-3] afirma que quando comparado com outros processos de soldagem a arco, o processo TIG autógeno é desvantajoso em termos de produtividade (no que diz respeito ao comprimento de cordão produzido em um mesmo período de tempo). Isso acontece pois, usualmente, relativas baixas velocidades de soldagem são empregadas nesse processo [3]. Ao aplicar-se maiores velocidades de soldagem no processo TIG autógeno, que implica também na utilização de maiores níveis de corrente de soldagem (permitindo a obtenção de cordões com geometria aceitável), a literatura apresenta como resultado cordões com descontinuidades do tipo *humping* [3, 4, 15, 16]. Desta forma, entende-se que além da questão produtiva, muitas vezes torna-se necessária a adição de material no processo TIG a fim de obter-se os cordões de solda desejados [17].

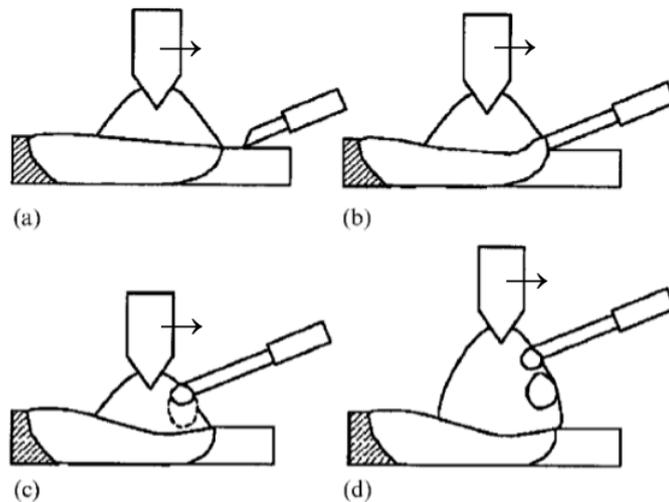
No que concerne ao processo de soldagem TIG com adição de material, pode-se classificá-lo em com alimentação manual ou mecanizada. Quando a alimentação é realizada de maneira manual, naturalmente tem-se uma menor taxa de deposição devido a capacidade limitada do soldador em depositar material, além da necessidade de trocas periódicas das varetas de metal de adição. Desta forma, quando aplica-se a alimentação de material de forma mecanizada, com o material na forma de arame, ganha-se em produtividade. Este aumento de produtividade, que agora está sendo diretamente associado ao aumento da taxa de deposição, é explicado também pelas maiores velocidades de soldagens passíveis de serem alcançadas na soldagem com alimentação de material mecanizada [18].

Yudodibroto et al. [19] classificam a transferência de metal no processo de soldagem TIG, no caso da alimentação de material mecanizada, em quatro categorias: transferência por fusão intermitente do arame, transferência em ponte contínua e ponte intermitente e transferência por voo livre. Segundo Yudodibroto et al. [19], a posição de alimentação do arame no arco tem influência direta no tipo de transferência observada. Quando o arame é alimentado em uma posição muito baixa em relação a peça de trabalho, como mostra a Figura 1a, a sua ponta atinge a peça de trabalho à frente da poça de fusão, resultando em uma fusão intermitente (transferência por fusão intermitente do arame), caracterizando uma condição indesejável [19]. Quando a alimentação é realizada em uma posição um pouco superior, ilustrada na Figura 1b, o metal líquido flui suavemente para a poça de fusão e pouca agitação do metal fundido é observada, caracterizando uma situação ideal de transferência metálica sob condições usais de soldagem (transferência em ponte contínua) [19]. Na medida em que se aumenta ainda mais a distância vertical entre a posição de alimentação do arame e a peça de trabalho, a gota de metal fundido cresce continuamente na ponta do arame, sendo destacada toda vez que toca a poça de fusão, pela ação majoritária da tensão superficial (transferência em ponte intermitente), como mostra a Figura 1c. Por fim, numa condição de maiores alturas de arco, com o arame sendo alimentado ainda mais distante do material de base, como mostra a Figura 1d, o destacamento das gotas de metal fundido ocorre predominantemente por ação da força de gravidade, caracterizando a transferência por voo livre.

Entende-se que houve um equívoco no que se refere a nomenclatura adotada por Yudodibroto et al. [19] para descrever a condição observada na Figura 1c, originalmente descrita pelos autores [19] como *interrupted bridging transfer* e traduzida no atual estudo como “transferência em ponte intermitente”. De fato, o que ocorre em tal modo de transferência são gotas de metal fundido transferidas de forma intermitente, e não a formação de uma ponte intermitente. No entendimento do atual estudo, a formação de uma ponte intermitente estaria

associada a uma ponte metálica instável. Portanto, no decorrer do trabalho será adotada a nomenclatura de “transferência intermitente” para fazer menção a tal condição operacional de transferência metálica à poça de fusão.

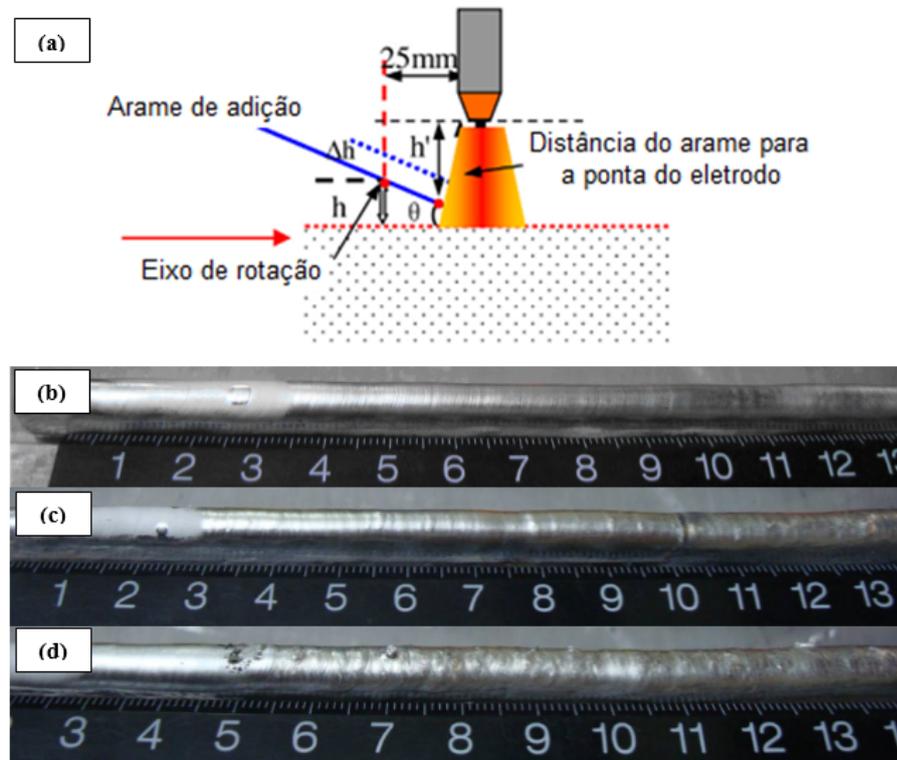
Figura 1 - Tipos de transferência metálica na alimentação de arame mecanizada no processo TIG. Em (a) transferência por fusão intermitente do arame, (b) transferência em ponte contínua, (c) transferência intermitente, (d) transferência por voo livre.



Fonte: Yudodibroto et al. [19].

Geng et al. [20] reiteram a mudança no tipo de transferência metálica observada em função da variação da posição de alimentação do arame. Os autores [20] afirmam que, nas condições estudadas por eles, a alteração em 0,5 mm nessa posição, no sentido de se distanciar mais do material de base, permitiu que as gotas de metal fundido na ponta do arame alcançassem um diâmetro de aproximadamente uma vez e meia o diâmetro do arame, reduzindo a frequência de destacamento, apesar de ambas as transferências estarem ocorrendo em ponte contínua. Ainda, aumentando a distância em 0,5 mm, os autores [20] relatam a mudança na forma de transferência metálica de ponte contínua para globular, que seria o equivalente a transferência por voo livre citada por Yudodibroto et al. [19]. Nessa última condição, foi relatada a presença de respingos, além de um cordão com superfície irregular, apresentando vales e cavas, como mostra a Figura 2d, caracterizando uma condição indesejável.

Figura 2 - Cordões produzidos com diferentes variações da posição de alimentação do arame (Δh) em relação a uma referência pré-estabelecida (h). Em (a) Esquemático, (b) $\Delta h = 0$ mm, (c) $\Delta h = 0,5$ mm, (d) $\Delta h = 1,0$ mm.



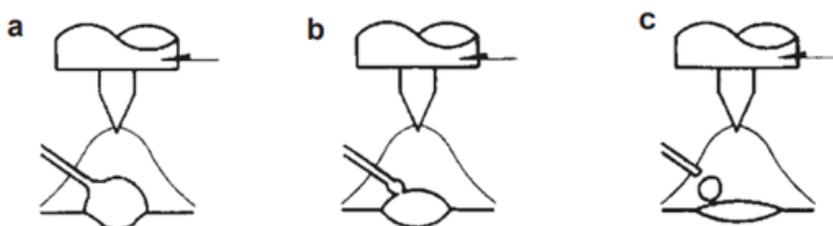
Fonte: Adaptado de Geng et al. [20].

Honma e Yasuda [21], aplicando o processo de soldagem TIG em chapas de aço inoxidável austenítico SUS304, com espessuras de 3 a 9 mm, discutem as mudanças no tipo de transferência metálica em função da variação da velocidade de alimentação e da bitola do arame, além de indicarem as mudanças em termos de geometria da zona de fusão resultante de cada modo de transferência. Os autores [21] ressaltam como principais três dos quatro modos de transferências citados por Yudodibroto et al. [19], apesar de adotarem nomenclaturas diferentes. São ressaltados: a transferência por contato (equivalente à transferência em ponte contínua do estudo [19]), transferência por contato intermitente (equivalente à transferência em ponte intermitente do estudo [19], corrigida para transferência intermitente no atual estudo) e transferência globular (equivalente à transferência por voo livre do estudo [19]).

No que diz respeito a velocidade de alimentação do arame, Honma e Yasuda [21] afirmam que a transferência em ponte contínua acontece na medida em que se aplicam velocidades relativamente elevadas, e o resultado é um cordão com pequena penetração e com um reforço expressivo, como mostra a Figura 3a. Para velocidades de alimentação do arame baixas, o que se espera é a transferência por voo livre, que resulta em um cordão com pequeno reforço e pequena penetração, como mostra a Figura 3c. Além disso, quando tem-se essa

condição de transferência metálica, a operacionalização do processo exige maior atenção, uma vez que torna-se necessário regular uma velocidade de soldagem que seja adequada ao destacamento das gotas, de maneira a evitar cordões com descontinuidades [21]. A Figura 3b ilustra uma condição de velocidade de alimentação do arame intermediária, caracterizando a transferência intermitente. Nessa condição, o arame é adicionado a poça de fusão continuamente através de pequenas gotas de metal fundido, dando origem a um cordão com geometria satisfatória [21]. Honma e Yasuda [21] afirmam que a forma de transferência metálica no processo TIG é fundamentalmente determinada pela velocidade de alimentação do arame.

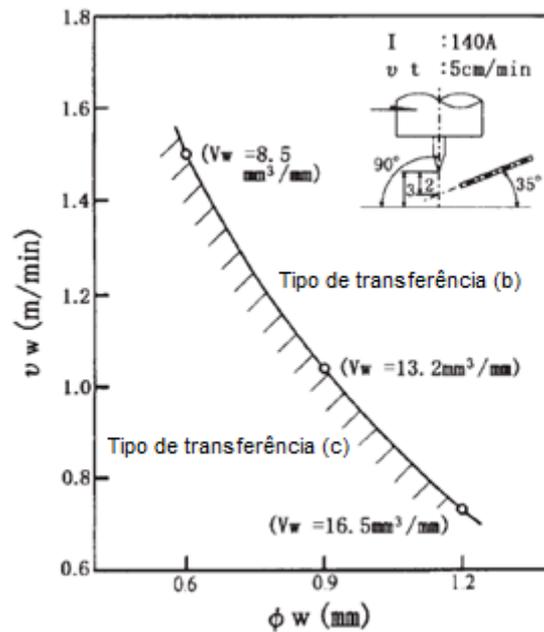
Figura 3 - Tipos de transferência metálica na alimentação de arame mecanizada no processo TIG e sua relação com a geometria da poça de fusão. Em (a) transferência em ponte contínua, (b) transferência intermitente, (c) transferência por voo livre.



Fonte: Adaptado de Honma e Yasuda [21].

Investigações a respeito dos efeitos da variação da bitola do arame e da velocidade de alimentação do arame no tipo de transferência metálica mostraram que, na medida em que a bitola é reduzida, para baixas velocidades de alimentação, a transferência metálica por voo livre é observada [21]. Ainda, na medida em que se a velocidade de alimentação do arame aumenta, observa-se a transferência metálica em ponte intermitente, que é a condição ideal relatada pelos autores [21] para a aplicação em seu estudo. Para maiores velocidades de alimentação do arame, em condições estáveis de transferência metálica, menores taxas de deposição são observadas, isso porque o efeito da diminuição no diâmetro do arame é preponderante a do aumento da velocidade de alimentação de material [21], nas condições estudadas, como mostra a Figura 4.

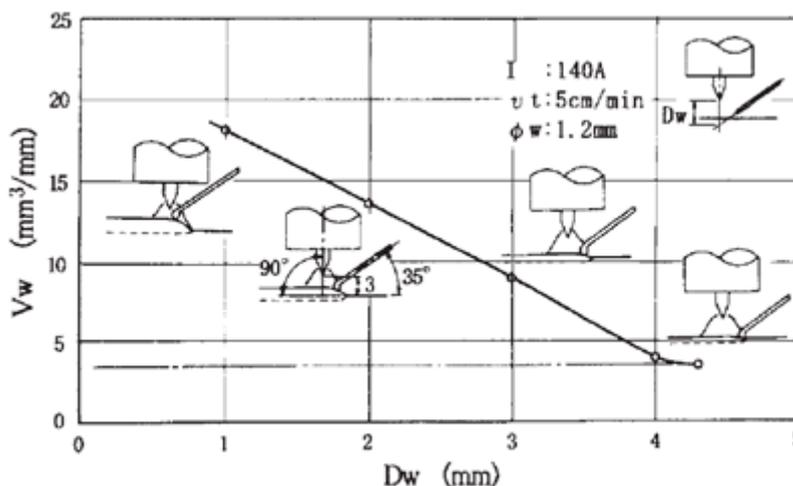
Figura 4 - Influência do diâmetro (ϕ_w) e da velocidade de alimentação do arame (v_w) no tipo de transferência metálica e na taxa de deposição obtidos no processo TIG.



Fonte: Adaptado de Honma e Yasuda [21].

Com relação a posição de alimentação do arame, Honma e Yasuda [21] afirmam que na medida em que o arame é alimentado mais próximo da poça de fusão, condição de menores valores D_w na Figura 5, maiores taxas de deposição são observadas quando a transferência metálica se dá em ponte contínua. Segundo os autores [21], isso acontece pois a transferência de metal para a poça de fusão é facilitada nessas condições. O parâmetro D_w é a distância vertical, medida a partir da ponta do eletrodo, até o ponto de cruzamento entre o eixo vertical do eletrodo e a ponta do arame de adição.

Figura 5 - Influência da posição de alimentação do arame na taxa de deposição (V_w) obtida no processo TIG (transferência em ponte contínua).



Fonte: Adaptado de Honma e Yasuda [21].

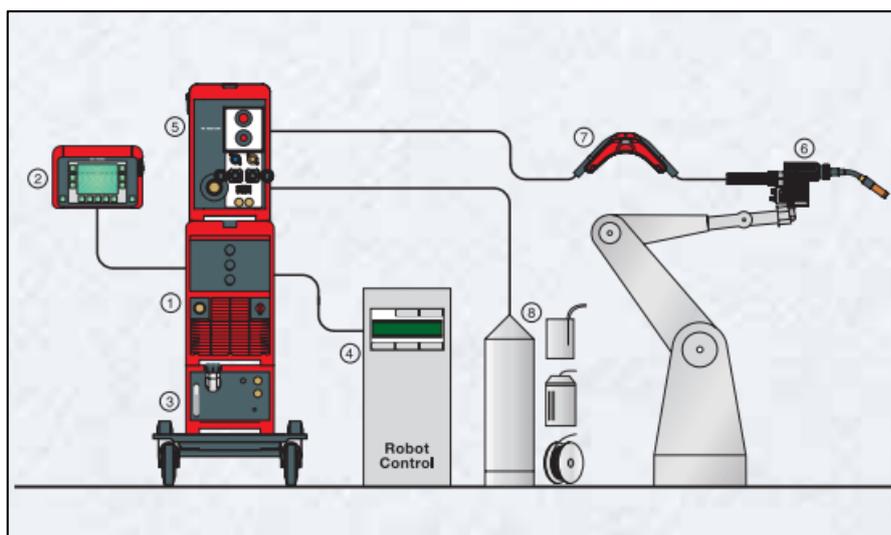
2.2 OSCILAÇÃO LONGITUDINAL DO MATERIAL DE ADIÇÃO

Nas últimas duas décadas, sobretudo na última, algo que tem sido foco de muito interesse na academia é a alimentação do arame com oscilação longitudinal. No que tange os processos de soldagem, a capacidade inerente do soldador de perceber erros e atuar no sentido de corrigi-los, viabiliza a utilização de processos manuais. No entanto, a produtividade desses processos não é compatível com as exigências atuais da indústria [22]. Nesse contexto é que se apresenta a necessidade da aplicação de processos de soldagem mecanizados. Ainda, através do desenvolvimento de novas tecnologias que buscam potencializar os processos de soldagem mecanizados já existentes, é possível otimizar o trinômio qualidade, baixo custo e alta produtividade [23], o que é de íntimo interesse da indústria. Além de melhorias em termos produtivos, a oscilação longitudinal do arame pode trazer vantagens em questões relacionadas ao aporte térmico, taxa de deposição e estabilidade do processo, como é o caso do *Cold Metal Transfer* (CMT), uma tecnologia particular associada ao processo de soldagem MIG/MAG.

O CMT é uma modificação do processo de soldagem MIG/MAG baseado na transferência metálica por curto-circuito, sendo desenvolvido em 2004 pela empresa Fronius [24]. A principal inovação trazida pelo CMT em relação ao MIG/MAG convencional está associada ao movimento dinâmico e controlado do arame durante o processo de soldagem [25]. Para que esse movimento possa acontecer, o CMT conta com 2 tracionadores de arame, um responsável pela retração do arame, encontrado na tocha de soldagem e projetado para ter

elevada resposta dinâmica, e outro que alimenta o arame em direção a poça de metal fundido continuamente. Portanto, faz-se necessário o uso de um *buffer* de arame, que tem a função de criar uma folga entre os dois tracionadores, suavizando o movimento de retração [26], como mostra a Figura 6.

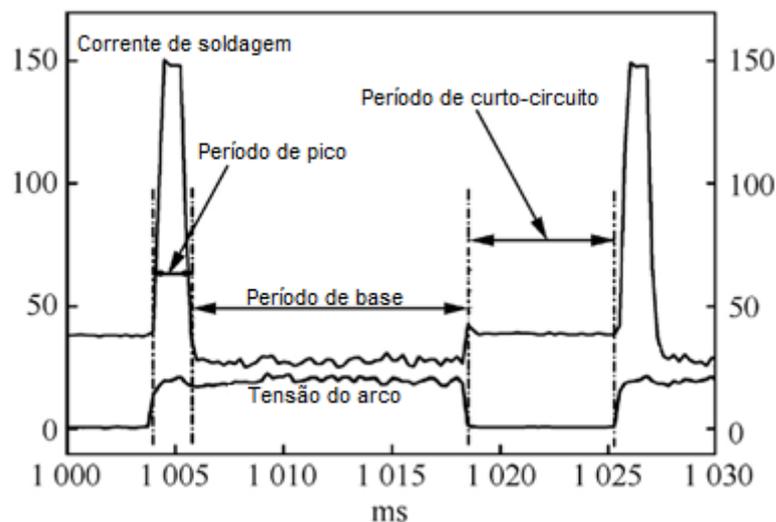
Figura 6 - Exemplo de setup de equipamento para soldagem CMT no caso da soldagem robotizada. Em (1) fonte de soldagem, (2) painel de controle da fonte, (3) unidade de refrigeração, (4) controle do robô, (5) alimentador contínuo de arame, (6) tracionador com elevada resposta dinâmica, (7) buffer, (8) bobina de arame.



Fonte: Fronius [27].

Além de controlar a velocidade e o sentido de alimentação do arame, no CMT a forma de onda da corrente de soldagem também é controlada, sendo dividida em 3 fases: fase da corrente de pico, fase da corrente de base e fase do curto-circuito [25]. Essas 3 fases compõem um período de onda, caracterizado como o tempo necessário para se destacar uma gota de metal fundido (Figura 7).

Figura 7 - Formas de onda da corrente de soldagem e tensão do arco no CMT.



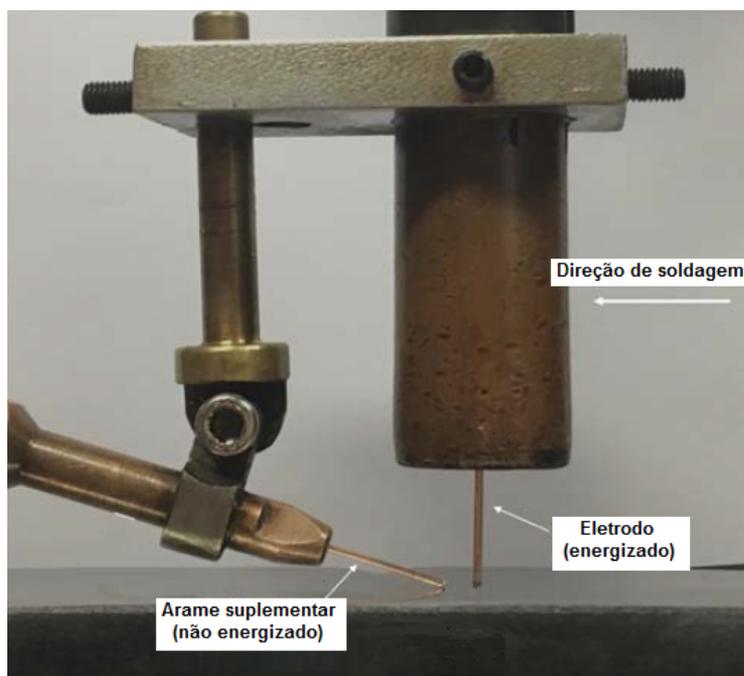
Fonte: Adaptado de Selvi, Vishvaksenan e Rajasekar [24].

Na fase da corrente de pico, os elevados valores de corrente facilitam a abertura do arco e iniciam a formação da gota de metal fundido. Nessa fase, observa-se uma intensa radiação luminosa do arco voltaico. Com o objetivo de impedir a formação de uma gota de grande volume, prevenindo a transferência globular, a corrente é reduzida rapidamente e inicia-se a fase da corrente de base, na qual a gota termina de ser formada. Na última fase, a de curto-circuito, a tensão do arco é reduzida ao seu menor patamar e o sistema de controle comanda o retrocesso do arame, que é o principal mecanismo de destacamento do metal fundido. O diâmetro da gota transferida é muito próxima do diâmetro do arame, e o destacamento da gota ocorre de maneira suave e estável [25]. Esse controle do destacamento das gotas através da oscilação longitudinal do arame permite a soldagem por curto-circuito com menores índices de respingos [24-26] e, portanto, com maiores taxas de deposição.

Talalaev et al. [26] afirmam que o CMT apresenta baixos níveis de distorções quando comparado ao MIG/MAG convencional. Além disso, afirmam [26] que o CMT poderia ser uma alternativa ao processo de soldagem TIG, devido ao baixo aporte térmico resultado da combinação da forma de onda adotada para a corrente de soldagem e do retrocesso do arame, além de apresentar cordões com baixos níveis de respingos. Os autores [26] ressaltam a importância desse baixo aporte térmico em aplicações envolvendo chapas de pequenas espessuras, nas quais as variações de temperatura entre solda e metal de base tem grande influência em termos de geração de tensões residuais e alteração da configuração final de produtos soldados, como resultado de distorções.

A oscilação longitudinal do arame no processo de soldagem MIG/MAG não é restrita a utilização da tecnologia CMT. O estudo de Jorge et al. [28] mostra a alimentação de um arame suplementar na soldagem MIG/MAG com oscilação longitudinal, promovida por um dispositivo de desenvolvimento próprio, cujo princípio de funcionamento é descrito no estudo [7] e apresentado na seção 2.2.2 do presente trabalho. O posicionamento do arame suplementar junto a tocha MIG/MAG pode ser observado na Figura 8.

Figura 8 - Posicionamento do arame suplementar junto a tocha MIG/MAG.



Fonte: Adaptado de Jorge et al. [28].

Na soldagem de chapas de aço carbono ASTM 1020 com 9,5 mm de espessura, utilizando a técnica de simples deposição sobre chapa tanto na superfície da chapa sem preparação quanto no preenchimento de chanfros em “V”, foram variados a frequência de oscilação, bem como o ângulo entre o arame e a peça de trabalho. Frequências de 4 e 16 Hz e ângulos de 15 e 45 graus foram adotados. A amplitude de oscilação do arame foi mantida constante e igual a 7 mm. O trabalho [28] mostrou que nenhuma variação significativa pôde ser observada nas características geométricas do cordão de solda pela alteração dos parâmetros da oscilação longitudinal do arame nos ensaios com chapas sem chanfro. No entanto, quando os cordões de solda foram depositados nos chanfros, a frequência de pulsação mais elevada resultou em alterações associadas a aspectos térmicos perceptíveis. A oscilação longitudinal do arame interferiu no gradiente térmico próximo à poça de fusão, segundo os autores [28]. Para a maior frequência adotada (16 Hz), em ambos os ângulos de alimentação aplicados, uma menor

quantidade de calor foi transferida para a peça de trabalho. O menor fornecimento de calor nesses casos limitou o crescimento dos grãos na Zona Termicamente Afetada de Grãos Grosseiros (ZAC-GG).

Jorge et al. [29] também utilizaram o dispositivo desenvolvido [7] para promover diretamente a oscilação do eletrodo no processo MIG/MAG, sem a presença do arame suplementar. Com o objetivo de avaliar a influência da oscilação longitudinal na penetração das soldas, foram realizados ensaios em chapas de aço ASTM 1020 de 6,4 mm de espessura, utilizando a técnica de simples deposição sobre chapa. Foram variados a frequência de oscilação (8 e 16 Hz) e o modo de operação da fonte (tensão constante e corrente constante). Maiores valores de penetração foram encontrados para o caso da oscilação longitudinal do arame, sendo esses valores maiores para o maior patamar de frequência. Esse efeito foi observado em ambos os modos de operação da fonte, sendo mais pronunciado no modo de tensão constante. Os autores [29] justificam o aumento da penetração com a aplicação da oscilação longitudinal do arame pelo menor tamanho das gotas de metal fundido que são lançadas na poça de fusão. Segundo os autores [29], gotas com maior volume tem uma entrada dificultada na poça de fusão, enquanto gotas menores conseguem alcançar o fundo da poça mais facilmente, promovendo um aumento na penetração.

O menor tamanho das gotas destacadas com a oscilação longitudinal do arame se justifica pela presença de uma força adicional de inércia que atua no sentido de destacamento da gota quando o arame passa do avanço para o recuo. Ou seja, a gota tende a manter o sentido do seu movimento em direção à poça quando repentinamente inverte-se o sentido de alimentação do arame, facilitando seu destacamento. Dessa forma, a força de gravidade (que é maior quanto maior for o volume da gota de metal fundido) não precisa contribuir de maneira tão significativa para o destacamento, permitindo que a gota possua um menor volume.

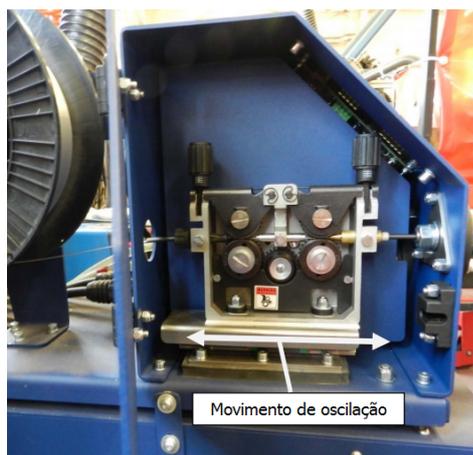
2.2.1 Oscilação longitudinal do arame no processo TIG

A oscilação longitudinal do arame no processo de soldagem TIG tem sido estudada como uma técnica para, além de alcançar maiores índices produtivos, aumentar ainda mais a estabilidade do processo, visando uma maior janela operacional [6]. Já na década de 80, Rudy [30] reportava a aplicação da oscilação do arame de adição no processo de soldagem TIG, através da técnica descrita como Dabber TIG. Segundo o autor [30], o Dabber TIG era uma modificação mecânica e eletrônica de um sistema de soldagem TIG automatizado, que buscava uma alimentação de material intermitente na poça de fusão. Segundo o autor [30], esta forma

de alimentação causaria o resfriamento momentâneo da poça de fusão, reduzindo a energia entregue a peça de trabalho.

Atualmente, a tecnologia mais consolidada para promover a oscilação longitudinal do arame nesse processo é conhecida como TIP TIG. O TIP TIG foi desenvolvido pelo engenheiro australiano Siegfried Plasch e patentado em 1999, após um ano e meio de desenvolvimento [31]. No TIP TIG de Plasch, juntamente com a alimentação do arame em regime estacionário, e seu aquecimento por efeito Joule - caracterizando, portanto, um TIP TIG *hot wire*, um mecanismo promove a oscilação do conjunto tracionador para frente e para trás (Figura 9), resultando no avanço e retrocesso da ponta do arame sendo alimentado na poça de fusão. Essa movimentação introduz energia cinética na poça de fusão, que pode estar associado aos ganhos metalúrgicos e em propriedades mecânicas ressaltados por Wilson [31].

Figura 9 - Base móvel que promove a movimentação oscilatória do conjunto tracionador no TIP TIG.



Fonte: Adaptado de Pike [32].

De acordo com Wilson [31], o TIP TIG é uma técnica que permite a utilização de velocidades de soldagens compatíveis com as dos processos de eletrodo consumível e, assim, combina uma relativa elevada produtividade com a qualidade superficial característica dos cordões obtidos com o processo TIG. De acordo com Plasch [33], o TIP TIG tem como benefícios o aumento na taxa de deposição, além da melhora na qualidade das soldas, em relação ao TIG convencional, fornecendo menor quantidade de calor ao material e, portanto, proporcionando melhoras em termos metalúrgicos. A menor quantidade de calor fornecida ao material está associada a possibilidade de atingir-se maiores velocidades de soldagem e, por consequência, para produzir um mesmo comprimento de cordão, uma menor energia em forma de calor é entregue a peça de trabalho. As velocidades de soldagem comumente aplicadas no

TIP TIG se apresentam no intervalo de 20 a 127 cm/min, contra 5 a 20 cm/min do TIG convencional, segundo Plasch [33]. Wilson [31] afirma que o ganho em termos de velocidade de soldagem é cerca de três vezes em relação ao TIG convencional. Ainda, Pike [32] reitera uma menor quantidade de calor entregue ao material quando utiliza-se o TIP TIG, em relação ao TIG convencional.

Quantitativamente, Plasch [33] afirma que na maioria das aplicações, pode-se obter um ganho de 200 a 400% por hora em termos produtivos na comparação entre o TIG convencional e o TIP TIG, além de até 60% em redução de custos. O ganho produtivo também está associado a maior velocidade de soldagem aplicada no TIP TIG, segundo Plasch [33], já que em um mesmo período de tempo um cordão de maior comprimento pode ser produzido. Já em relação aos custos, Plasch [33] ressalta o menor tempo necessário para produzir um mesmo comprimento de cordão, o que leva a uma redução expressiva do consumo dos gases de proteção.

Ainda, Plasch [33] ressalta que com a agitação mecânica adicionada a poça de fusão, resultado do avanço e retrocesso do metal de adição, tem-se um metal fundido com maior fluidez e energia acumulada, sendo capaz de promover uma melhor fusão das paredes que compõe as juntas. Isso resulta em uma expansão na janela do processo, de maneira que é exigido um menor cuidado por ocasião da preparação das juntas. A agitação mecânica adicionada à poça de fusão também é responsável, segundo Plasch [33], por aumentar o tempo de solidificação do metal fundido. Isso faz com que mais material possa ser adicionado e, portanto, justifica a utilização de velocidades de soldagens expressivamente mais elevadas.

Como visto, uma série de vantagens são atribuídas ao TIP TIG. No entanto, em função da forma com a qual é promovida a oscilação da ponta do arame, com a movimentação de todo o cabeçote tracionador, além da necessidade de um dispositivo com grandes dimensões, ocorre a geração de significativos níveis de ruídos e vibrações no sistema [34]. Além disso, o TIP TIG permite a variação da frequência de oscilação da ponta do arame até 20 Hz [33] para uma amplitude fixa, o que limita a investigação da influência das variações desses parâmetros correlacionados no processo [34]. Por fim, a distância entre a região na qual é promovida a oscilação - cabeçote tracionador, e a ponta do arame, faz com que a oscilação seja conduzida por todo o comprimento do conduíte presente no mangote da tocha até o bico direcionador. Segundo Martins [34], o efeito elástico (ou efeito mola) existente no decorrer do caminho do arame pelo mangote pode criar efeitos significativos sobre a resposta final de oscilação, como a diminuição da amplitude de oscilação desejada, adicionando variáveis como o comprimento e o posicionamento do mangote como influência na oscilação do arame. Ou seja, no TIP TIG,

o efeito mola pode ser responsável por mitigar a oscilação do arame no sentido de recuo, de maneira que a oscilação se apresente majoritariamente no sentido de avançar o arame na direção da poça de fusão. Nesse sentido, novas tecnologias vêm sendo desenvolvidas e avaliadas em vias de permitir uma oscilação longitudinal do arame mais eficiente no processo de soldagem TIG.

2.2.2 Tecnologias para a oscilação longitudinal do arame no processo TIG

A presente seção do trabalho apresenta tecnologias já desenvolvidas ou em desenvolvimento que visam a oscilação longitudinal do arame e que têm ampla utilização no processo de soldagem TIG. Tal fato não impede que tais tecnologias possam ser aplicadas para promover a oscilação do arame em outros processos de soldagem, dada a sua versatilidade.

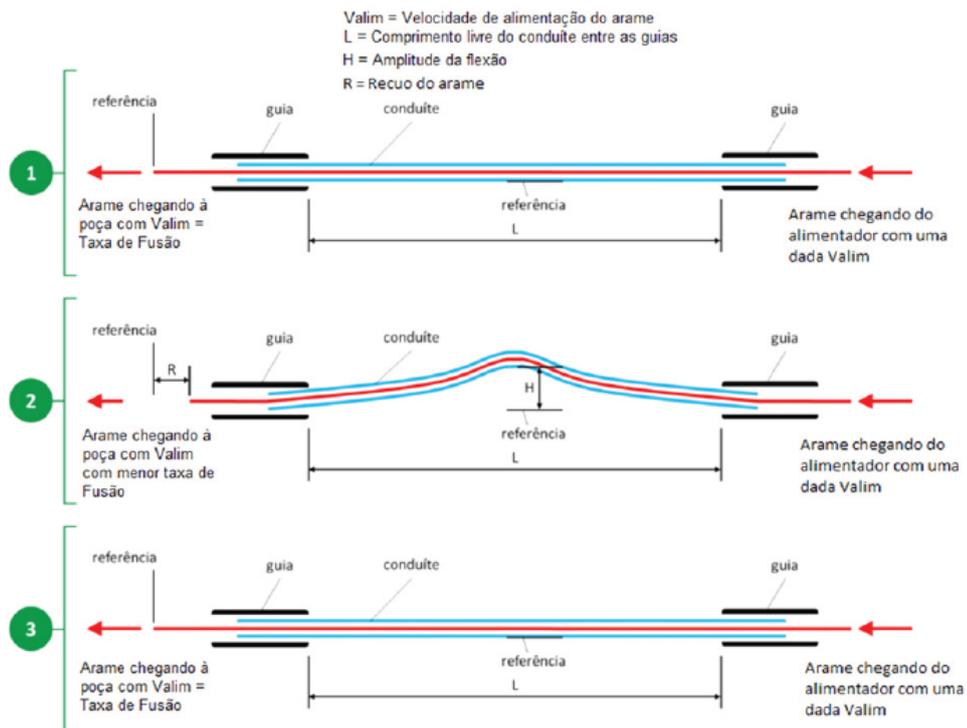
Silva et al. [6] utilizaram um protótipo específico para a oscilação longitudinal do arame no processo TIG em baixas frequências, desenvolvido pela empresa IMC. O protótipo foi nomeado como *Wire Traction System (WTS)* e funciona com base na inversão do sentido de rotação do motor do sistema de alimentação de arame. Detalhes de aspectos construtivos bem como imagens do dispositivo não foram divulgados pelos autores. No entanto, é relatado que o equipamento permite a regulação das variáveis: tempo de avanço da ponta do arame, tempo de retrocesso, velocidade de avanço e velocidade de retrocesso. Com essas variáveis definidas, portanto, obtém-se por consequência a amplitude de avanço e retrocesso da ponta do arame. Com o protótipo operando em uma frequência de oscilação de 1 Hz, uma amplitude de oscilação total (soma das amplitudes de avanço e retrocesso) de 7,2 mm foi alcançada. Já com frequência de oscilação de 2 Hz, 3,6 mm de amplitude total foi alcançada. Sabendo que a velocidade de oscilação do arame adotada foi de 0,5 m/min (8,33 mm/s), esses resultados mostram que as amplitudes obtidas são menores do que as ideais (que seriam 8,33 mm para a frequência de 1 Hz e 4,16 mm para 2 Hz). Tal efeito de diminuição da amplitude ocorreu em função do posicionamento do condúite, segundo os autores [6]. Este fato leva a inferir que o movimento oscilatório no protótipo em questão se dá relativamente distante do bico direcionador, causando problemas semelhantes aos observados no TIP TIG.

A literatura apresenta algumas técnicas e dispositivos compactos desenvolvidos para promover a oscilação longitudinal do arame mais próximo ao arco voltaico, mitigando o efeito elástico ressaltado por Martins [34]. Jorge et al. [7] estudaram técnicas para a oscilação da alimentação do arame de forma independente de alimentadores e/ou tochas especiais. Duas

técnicas foram discutidas e apresentadas pelos autores [7] em seu trabalho, uma com acionamento eletromecânico e outra com eletromagnético.

Nas técnicas propostas por Jorge et al. [7], o arame percorre o conduíte com uma velocidade constante proveniente da alimentação externa do cabeçote tracionador. Considerando que o arco possui energia suficiente para igualar a taxa de alimentação à taxa de fusão do arame, a distância entre a ponta do arame e o fim do conduíte se mantém constante inicialmente. A oscilação ocorre quando uma força transversal é aplicada ao conduíte, de forma a flexioná-lo, resultando em uma retração de ambos o conduíte e o arame que o percorre, como mostra a Figura 10. Os autores [7] explicam que como o arame fica livre para deslizar pelo conduíte, fisicamente o que acontece no momento da aplicação da força transversal é um aumento instantâneo do comprimento de conduíte percorrido pelo arame, resultando numa menor quantidade de arame chegando à poça de fusão, considerando que a velocidade de alimentação fornecida pelo tracionador é constante. Esta forma de promover a oscilação na alimentação do arame é chamada pelos autores [7] de “pulmão ativo”, em referência ao CMT, cuja abordagem seria uma espécie de “pulmão passivo”, já que existe um *buffer* para a acomodação das diferenças entre a velocidade de alimentação do arame, e a velocidade de recuo promovida pelos tracionadores presentes na tocha.

Figura 10 – Funcionamento da técnica de oscilação longitudinal do arame “pulmão ativo”.

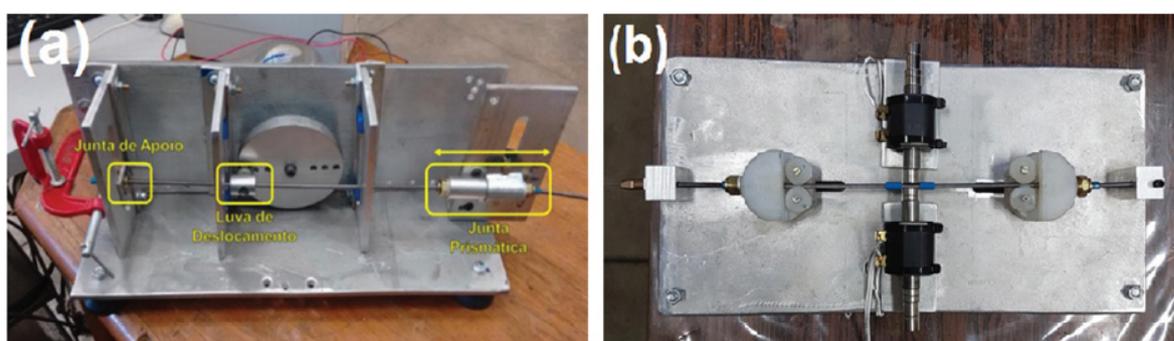


Fonte: Jorge et al. [7].

Ainda com relação à técnica de oscilação longitudinal do arame proposta por Jorge et al. [7], verifica-se que diferentemente do que pode acontecer no TIP TIG em função da parametrização do processo de soldagem adotada (o arame oscilar majoritariamente no sentido de avanço), no dispositivo de Jorge et al. [7], por seu aspecto construtivo, o arame realiza necessariamente apenas o movimento de recuo.

A diferença entre as técnicas estudadas por Jorge et al. [7] se resume no acionamento do mecanismo que promove a flexão transversal do conjunto conduíte e arame. No caso do acionamento eletromecânico, um motor promove o movimento rotativo de um disco de alumínio que possui furos colineares ao seu raio, Figura 11a. Nesses furos são encaixados pinos que se encontram a uma luva de deslocamento. Essa luva transfere o movimento imposto sobre ela ao conduíte. A posição dos furos em relação ao centro geométrico do disco de alumínio define a amplitude de oscilação do arame, o que segundo os autores [7] é desvantajoso por não permitir o controle dessa variável remotamente. Já a frequência de oscilação pode ser controlada pela velocidade de rotação do motor. Jorge et al. [7] relatam que em avaliações iniciais foi possível se obter amplitudes de oscilação de até 17 mm e frequências de até 44 Hz para esse dispositivo, que foi utilizado posteriormente pelos autores [7] em ensaios de soldagem TIG.

Figura 11 – Dispositivos utilizados para avaliar a técnica “pulmão ativo” com diferentes formas de acionamento da oscilação transversal. Em (a) acionamento eletromecânico e em (b) acionamento eletromagnético.



Fonte: Jorge et al. [7].

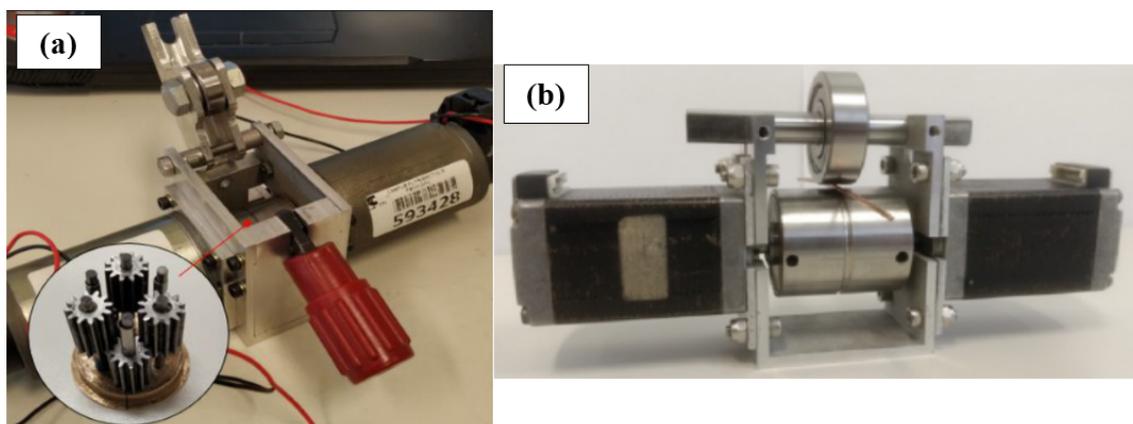
No acionamento eletromagnético, a oscilação transversal do conduíte acontece através do princípio de repulsão e atração entre o campo magnético de solenoides e ímãs permanentes. Foram posicionados no centro de cada solenoide um eixo deslizante fabricado em material ferromagnético - para concentrar as linhas de campo geradas no solenoide e aumentar a interação entre os campos magnéticos com os dos ímãs permanentes, Figura 11b. Nas extremidades de cada cilindro deslizante foi colocado um ímã permanente. Assim, a resultante das interações magnéticas de cada um dos dois propulsores (solenóide e ímã permanente) se

somam e promovem a oscilação dos eixos deslizantes, que transferem o movimento de oscilação transversal para o condutor. Nesse caso, a frequência e amplitude de oscilação são controlados pela alimentação elétrica do solenoide. Ainda, os autores [7] não relatam os intervalos obtidos dessas variáveis para o dispositivo com acionamento eletromagnético.

Junior [8] e Volkert [9] desenvolveram protótipos semelhantes entre si para promover a oscilação longitudinal do arame. A diferença entre os dispositivos consistiu nos motores utilizados para promover a oscilação do arame: motores elétricos de passo controlados em malha aberta no modo posição, no trabalho de Volkert [9], e motores elétricos de corrente contínua e escovas controlados em modo torque, no trabalho mais recente de Junior [8]. Junior [8] justifica a utilização dos motores CC de escovas pelo fato desse poder ser acionado por um driver mais simples e, no caso da necessidade de um controle mais sofisticado, permitir a utilização de um *encoder* em malha fechada de posição. Além disso, o autor [8] ressalta as vantagens do motor CC com escovas em termos do seu excelente desempenho torque *versus* velocidade e do controle não sofisticado de torque e de velocidade.

Em ambos os estudos [8, 9] os motores fornecem movimento para uma transmissão diferencial de velocidades, que se baseia no princípio de funcionamento do redutor planetário. Essa transmissão atua em um cilindro com ranhura (chanfro em “U”), semelhante aos roletes de tracionadores de arame comerciais, que é responsável por retroceder e avançar o arame por atrito. Segundo ambos os autores [8, 9], a utilização da transmissão diferencial se dá em função da possibilidade que ela atribui de inversão no sentido de rotação dos cilindros com ranhuras e, conseqüentemente, do sentido de deslocamento do arame (avanço ou retrocesso), sem que exista a necessidade de inverter a rotação dos motores elétricos na entrada. Tal efeito de inversão é obtido em função da utilização de sentidos de rotação opostos entre os motores que atuam na transmissão diferencial. A mudança sincronizada das velocidades de rotação desses motores permite que se obtenha uma composição final de movimentos, realizada pela transmissão diferencial, que possui sentido de rotação variável no tempo. Os dispositivos de Junior [8] e Volkert [9] são apresentados na Figura 12.

Figura 12 – Protótipos para a oscilação longitudinal do arame com transmissão diferencial de velocidades. Em (a) protótipo com motores CC de escovas, (b) protótipo com motores de passo.



Fonte: Adaptado de Junior [8] e Volkert [9].

Junior [8] relata ter alcançado com seu protótipo frequências de oscilação de até 22 Hz, com uma amplitude total de 4,5 mm. Já Volkert [9] não apresenta a amplitude máxima alcançada, mas relata o limite superior de frequência obtido de 20 Hz.

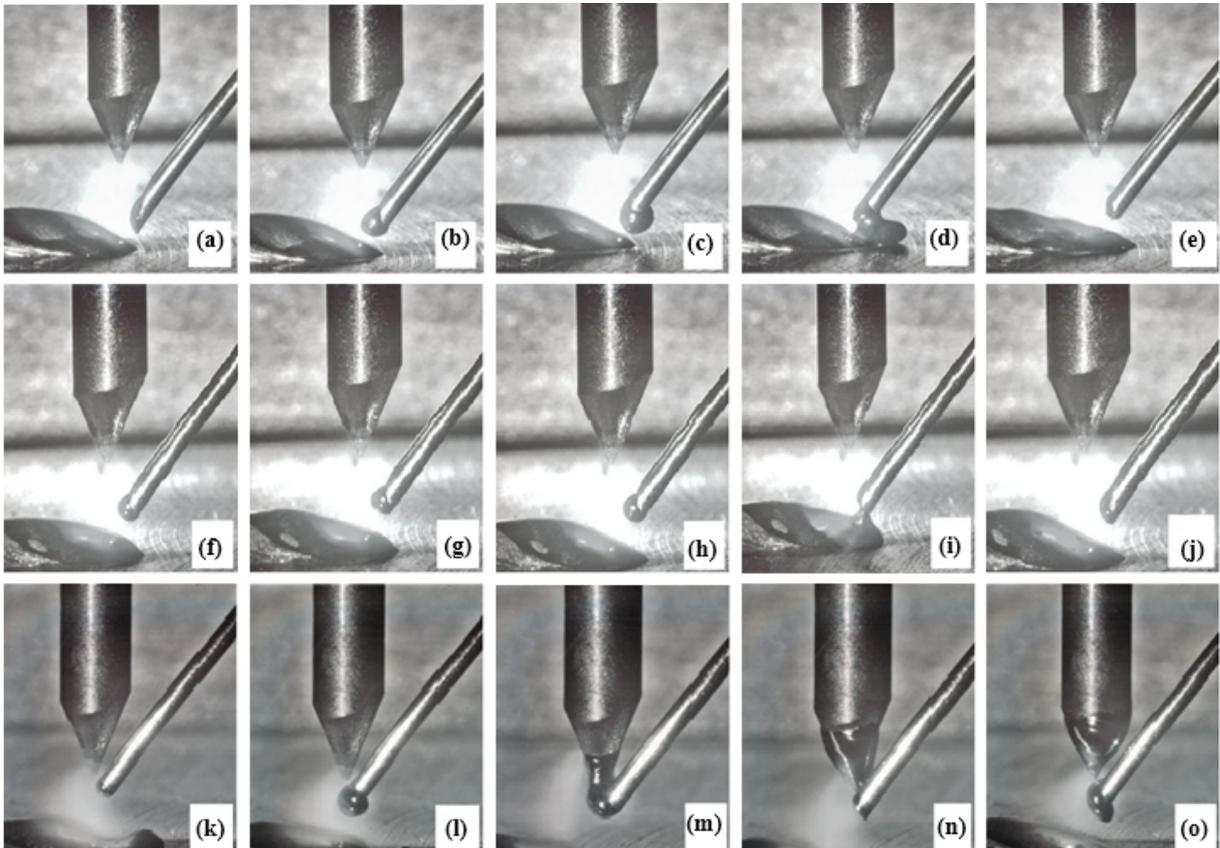
2.2.3 Efeitos da oscilação longitudinal do arame na soldagem TIG

Associado a manutenção de turbinas para o setor aeronáutico, o estudo de Rudy [30] mostrou que a aplicação da oscilação longitudinal do arame no processo de soldagem TIG com frequências de oscilação entre 3 e 11 Hz e amplitudes de oscilação entre 5 e 6 mm pode resultar em maior uniformidade na geometria do cordão, principalmente com a utilização de pequenas correntes de soldagem. Silwal e Santangelo [35] relatam que numa aplicação de simples deposição sobre chapas de 3,2 mm de espessura de aço baixo carbono, a oscilação longitudinal do arame em uma frequência de 16 Hz reduziu o tempo de destacamento das gotas de metal fundido, haja vista a presença de uma força extra associada a vibração do arame, mas que não surtiu efeitos na penetração dos cordões de solda.

Silva et al. [36], com o objetivo de estudar a contribuição da oscilação longitudinal do arame em altas frequências para o aumento da robustez do processo de soldagem TIG, realizaram ensaios de soldagem utilizando a técnica de simples deposição sobre chapa em chapas de aço carbono SAE 1020 com 9,5 mm de espessura. Ressalta-se que o ângulo entre o arame de adição e a peça de trabalho (horizontal) adotado foi de 45 graus, caracterizando uma condição de alimentação tangencial de material. Além disso, a frequência de oscilação do arame aplicada nas soldagens foi 18 Hz. A análise da variação da tensão de arco nos dois casos (com

e sem oscilação longitudinal) permitiu concluir que com a oscilação longitudinal, a formação e posterior destacamento das gotas de metal fundido é mais uniforme, regular e homogênea. Além disso, como a ponta do arame fica durante um menor período de tempo no arco, com a oscilação longitudinal existe uma menor tendência a formação de gotas com grande volume, como mostra a comparação entre a Figura 13a-e e Figura 13f-j. Os autores [36] ainda afirmam que além do melhor comportamento elétrico da alimentação do arame com oscilação longitudinal (observado na variação da tensão do arco), que resulta em uma entrega de calor mais regular para a peça de trabalho, a oscilação longitudinal também produz um processo mais robusto contra instabilidades que poderiam ser causadas por uma eventual contaminação do eletrodo no caso da alimentação contínua (gotas de metal fundido com maior volume), como mostra a Figura 13k-o. A análise da Figura 13k-o ainda permite a observação de que o arame adicionado está posicionado mais próximo ao eletrodo, o que por si só poderia favorecer a sua contaminação.

Figura 13 – Destacamento da gota de metal fundido. Em (a-e) alimentação contínua do arame, (f-j) oscilação longitudinal do arame, (k-o) contaminação do eletrodo durante soldagem com alimentação contínua do arame.

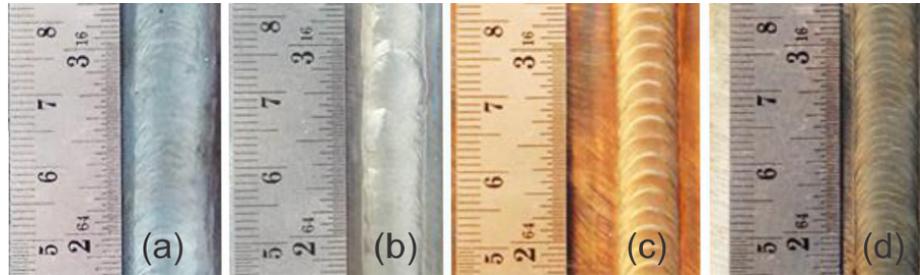


Fonte: Adaptado de Silva et al. [36].

Riffel et al. [37] também apresentam resultados associados a maior robustez do processo TIG quando utiliza-se a oscilação longitudinal do arame. Os autores [37] estudaram a soldagem orbital de tubos de aço inoxidável austenítico AISI304L, com 304,8 mm de diâmetro e 12,7 mm de espessura de parede. O efeito do emprego da oscilação longitudinal do arame com frequência de oscilação de 20 Hz foi pronunciado na soldagem sobre cabeça, na qual a utilização da alimentação contínua do arame facilitaria, segundo os autores [37], a contaminação do eletrodo de tungstênio pela presença das gotas de metal fundido com grande volume, devido à ação de gravidade sobre as gotas. O estudo ressalta que o movimento de avanço e retração do arame resultou em um processo robusto, com reprodutibilidade e com uma transferência metálica suave, diminuindo as instabilidades da alimentação contínua.

Silva et al. [6], utilizando chapas de aço SAE1020 com 6,35 mm de espessura e a técnica de simples deposição sobre chapa, mostraram que com a oscilação longitudinal do arame sendo aplicada em frequências de oscilação de até 2 Hz, tem-se a possibilidade de se atingir uma transferência metálica estável mesmo para relativas baixas velocidades de alimentação do arame. Silva et al. [6] ressaltam que na alimentação contínua convencional, essas baixas velocidades resultariam em transferência por vôo livre, caracterizada por ser indesejável devido a maior probabilidade da presença de respingos, irregularidades da face do cordão e instabilidades do arco voltaico (pelo grande volume das gotas), efeitos descritos por Geng et al. [20] e Honma e Yasuda [21]. Ainda, os autores [6] mencionam que a transferência metálica ocorreu inteiramente dentro da poça de fusão, sem formação prévia de gotas para transferência, o que favoreceria a soldagem fora de posição e diminuiria o risco de contaminação do eletrodo de tungstênio. Imagens que mostram a face dos cordões para os casos de: soldagem TIG autógena, soldagem TIG com alimentação contínua do arame, com oscilação longitudinal em frequência de 1 Hz e em frequência de 2 Hz são apresentadas na Figura 14. Os autores [6] relatam a inobservância de variação significativa na largura do cordão com a aplicação da oscilação longitudinal do arame, e chamam atenção para o aspecto escamado da face do cordão nos casos de oscilação longitudinal, embora a pulsação da corrente não tenha sido aplicada.

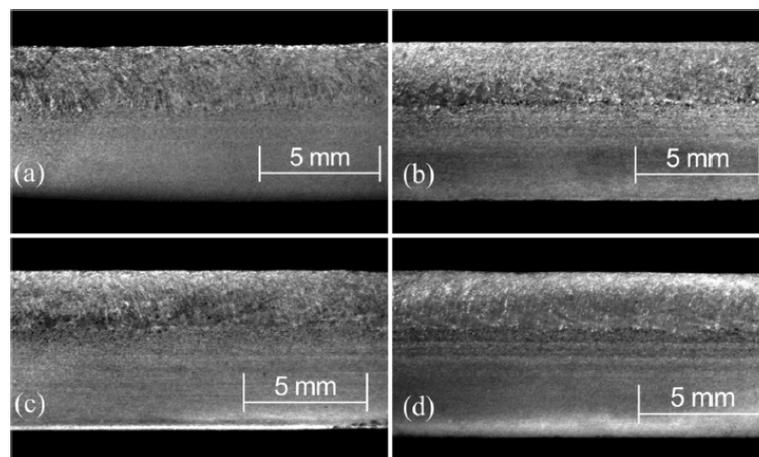
Figura 14 – Comparação entre a face dos cordões. Em (a) sem alimentação de arame, (b) com alimentação contínua do arame, (c) com oscilação longitudinal do arame: 1 Hz, (d) com oscilação longitudinal do arame: 2 Hz.



Fonte: Silva et al. [6].

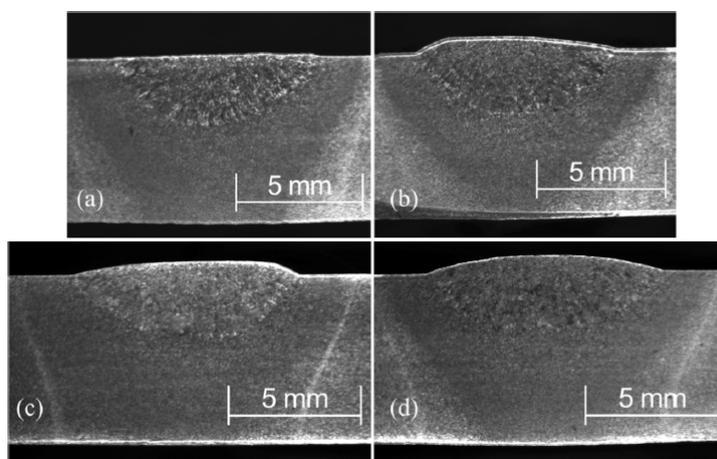
Macrografias das seções transversais e longitudinais são apresentadas por Silva et al. [6] na investigação da regularidade (longitudinal) e variação (transversal) da penetração das cordões soldas (Figura 15 e Figura 16). Segundo os autores [6], foi observada maior regularidade na penetração no caso da oscilação longitudinal do arame, apesar de não ficar evidente tal afirmação pela observação da Figura 15. Ainda, os autores [6] relatam menores valores de penetração com adição de material à poça, seja essa adição promovida através de alimentação contínua ou com oscilação longitudinal do arame, embora estatisticamente essa variação não seja confirmada. No estudo, é ressaltado que a inobservância de variações significativas nos aspectos geométricos dos cordões de solda podem estar associados aos pequenos valores de frequência de oscilação adotados, sendo que as conclusões obtidas se relacionam única e exclusivamente as condições operacionais adotadas.

Figura 15 – Comparação entre seções longitudinais dos cordões. Em (a) sem alimentação de arame, (b) com alimentação contínua do arame, (c) com oscilação longitudinal do arame: 1 Hz, (d) com oscilação longitudinal do arame: 2 Hz.



Fonte: Silva et al. [6].

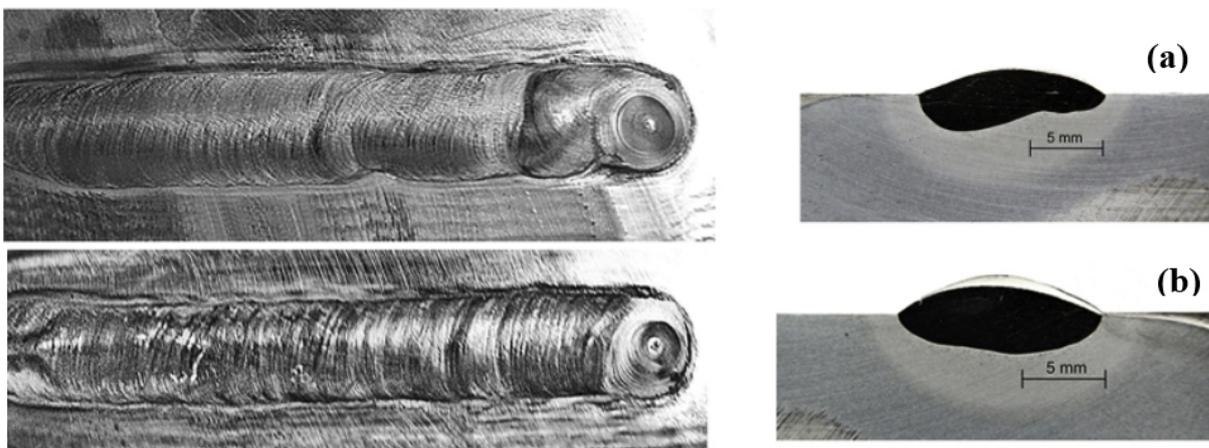
Figura 16 – Comparação entre seções transversais dos cordões. Em (a) sem alimentação de arame, (b) com alimentação contínua do arame, (c) com oscilação longitudinal do arame: 1 Hz, (d) com oscilação longitudinal do arame: 2 Hz.



Fonte: Silva et al. [6].

Silva et al. [38] realizaram seus estudos em chapas de aço carbono de 12,5 mm de espessura revestidas com uma camada de 3 mm Inconel 625, sendo os corpos de prova projetados para simular a soldagem de tubulações para a indústria petrolífera. No trabalho, utilizando uma frequência de oscilação de 20 Hz, os autores [38] mostraram que ao promover a oscilação longitudinal do arame com o TIP TIG, obtiveram maior simetria dos cordões de solda, como mostra a Figura 17. Isso em função das maiores gotas resultantes da alimentação contínua do arame, que seriam responsáveis por tornar o processo menos robusto.

Figura 17 - Comparação da face e seção transversal dos cordões. Em (a) alimentação contínua do arame, (b) oscilação longitudinal do arame.

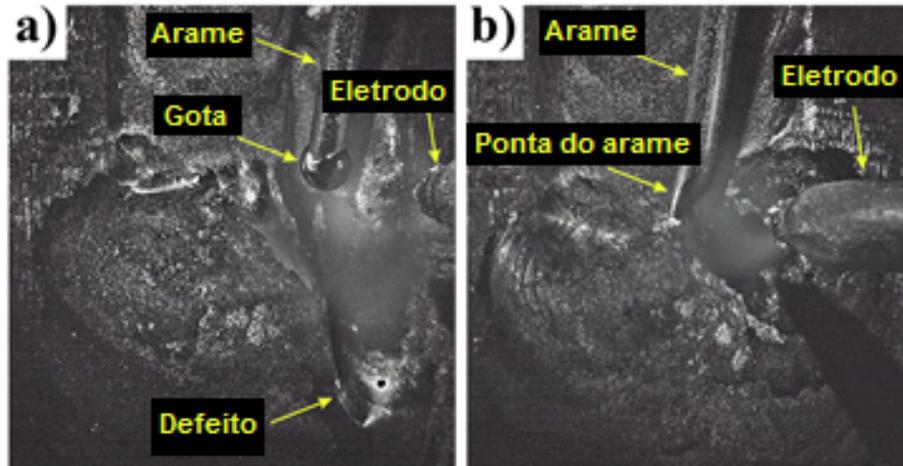


Fonte: Adaptado de Silva et al. [38].

Além disso, os autores [38] relatam a formação de um filme fino de metal fundido na ponta do arame devido à oscilação longitudinal do mesmo, diferentemente do que se observa

na alimentação contínua, com gotas de grande volume para as mesmas condições operacionais (Figura 18).

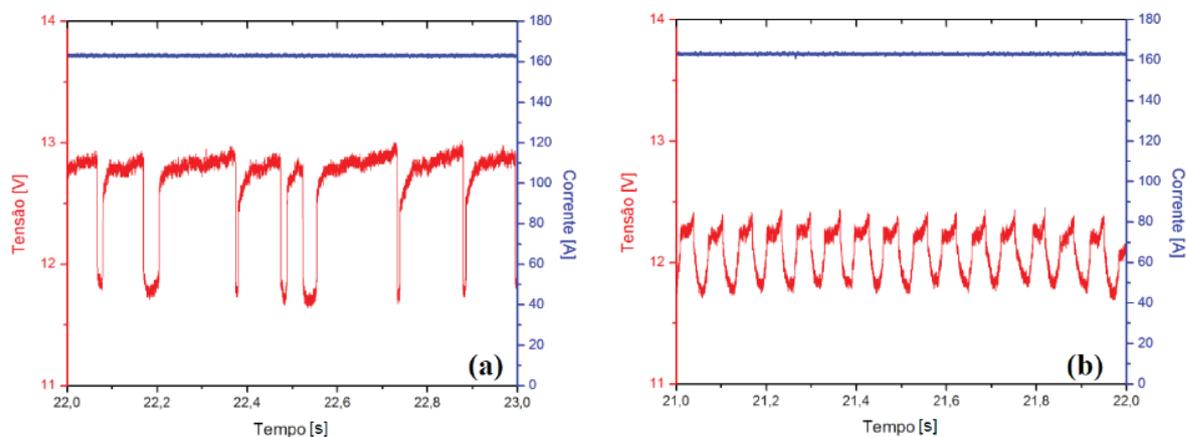
Figura 18 – Comparação da fusão do metal na ponta do arame. Em (a) alimentação contínua do arame, (b) oscilação longitudinal do arame.



Fonte: Adaptado de Silva et al. [38].

Jorge et al. [7], utilizando a técnica de simples deposição sobre chapa e chapas de aço carbono com 3 mm de espessura, com um arame de aço inoxidável de 1,2 mm de diâmetro - classe AWS ER 308LSi como material de adição, avaliaram os efeitos da frequência e amplitude de oscilação sobre a formação de cordões de solda. Os autores [7] apresentam as aquisições de tensão e corrente de soldagem durante ensaios realizados com e sem oscilação longitudinal do arame (Figura 19). Todo o aspecto operacional de ambos os ensaios se manteve constante, a não ser pela forma de alimentação do arame. A corrente de soldagem adotada foi de 160 A, e para o caso da oscilação longitudinal foi adotada uma frequência de 15 Hz e amplitude de oscilação de 8 mm. Jorge et al. [7] discutem que em função da regularidade do oscilograma de tensão no caso da oscilação longitudinal, gotas de metal fundido com constância em termos de volume são adicionadas à poça de metal fundido.

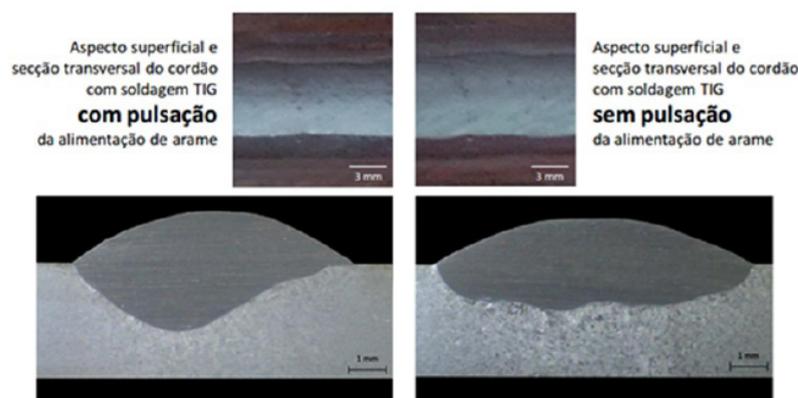
Figura 19 – Oscilogramas de corrente de soldagem e tensão do arco. Em (a) alimentação contínua do arame, (b) utilizando a técnica de “pulmão ativo” com acionamento eletromecânico.



Fonte: Jorge et al. [7].

Ainda, macrografias foram obtidas das seções transversais para ambos os ensaios, mostrando o efeito da oscilação longitudinal do arame na morfologia do cordão de solda (Figura 20). Com relação ao aspecto superficial dos cordões, não foram percebidas diferenças significativas. No entanto, a morfologia da zona de fusão, bem como a penetração apresentaram diferenças significativas. Com a oscilação longitudinal do arame, foi obtida uma penetração profunda e concentrada, já para a alimentação contínua, uma penetração rasa e distribuída. A concentração da penetração fora do eixo de simetria transversal do cordão se dá, segundo os autores [7], possivelmente porque o arame foi adicionado com falta de alinhamento à direção de soldagem. O aumento na penetração com a oscilação longitudinal do arame (até aproximadamente 20%) é atribuído à agitação da massa de metal fundido causada pela oscilação do arame a 15 Hz. Essa agitação teria sido responsável por alterar o perfil de convecção dentro da poça de fusão, resultando na mudança do perfil de penetração. No entanto, os autores [7] comparam os seus resultados aos estudos de Silva et al. [6] e de Silwal e Santangelo [35], os quais em condições semelhantes não apresentaram variações em termos de penetração das soldas. A justificativa para as diferenças encontradas por Jorge et al. [7] em relação ao estudo de Silva et al. [6] podem estar relacionadas as diferenças de frequência de oscilação empregadas. Já em relação ao trabalho de Silwal e Santangelo [35], embora frequências muito semelhantes tenham sido empregadas, os autores [7] relatam que a diferença pode estar associada ao fato de que em seus estudos operaram com o arame tocando a poça de fusão antes da transferência metálica, enquanto Silwal e Santangelo [35] não.

Figura 20 – Aspecto superficial e da seção transversal das soldas produzidas com e sem oscilação longitudinal do arame utilizando a técnica de “pulmão ativo” com acionamento eletromecânico.

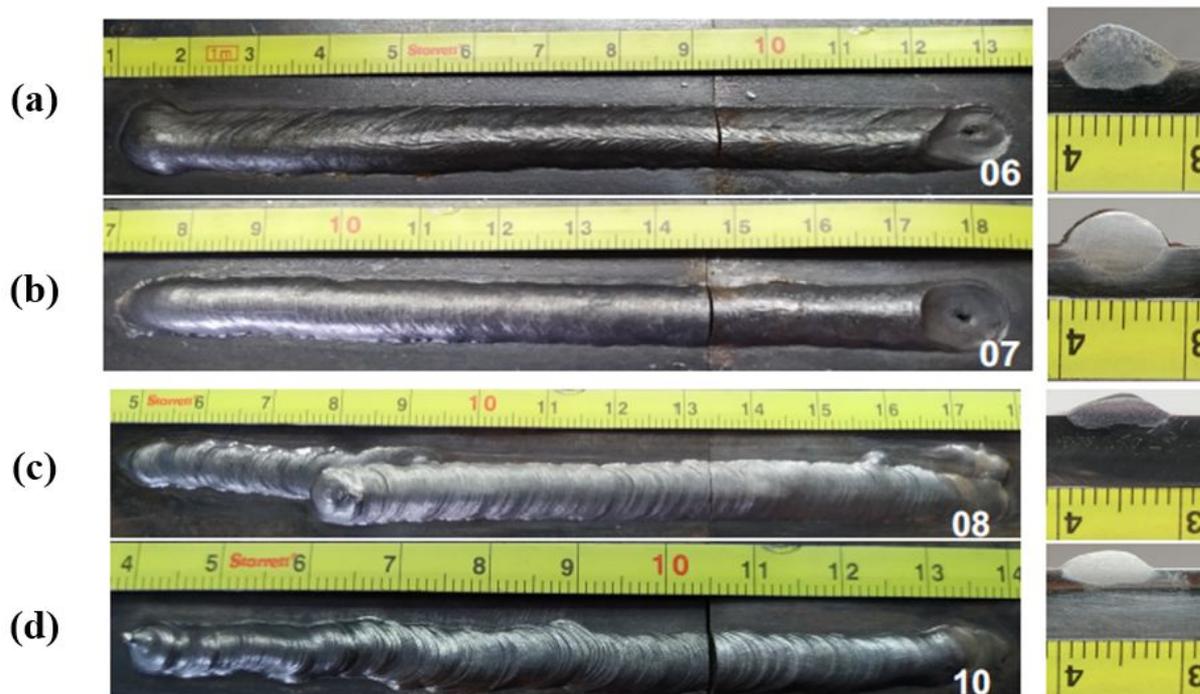


Fonte: Jorge et al. [7].

Por fim, Jorge et al. [7] ressaltam a menor largura (diminuição de até aproximadamente 20%) e a maior convexidade do cordão obtido com a oscilação longitudinal do arame. Como mostram os oscilogramas da Figura 19, a tensão média do arco para o caso da oscilação longitudinal é menor. Consequentemente, a dimensão radial do arco voltaico também é reduzida, resultando em uma menor largura do cordão. Ainda, com uma menor potência para o caso da oscilação longitudinal, já que tem-se menor tensão média para mesma corrente de soldagem, menor é o aquecimento do metal de base, o que resulta em um menor molhamento e espalhamento do metal fundido, causando um aumento no reforço (até aproximadamente 30%).

Volkert [9], em ensaios de simples deposição sobre chapa em corpos de prova de aço carbono ASTM A36 (200x80x3,75 mm) e arame de adição AWS ER70S-6 (\varnothing 1,2 mm), executou ensaios de soldagem com o processo TIG. Para ambas as condições, com ou sem oscilação longitudinal do arame, foram realizados ensaios com a alimentação à frente (convencional) e atrás (configuração TOPTIG) da tocha. Sendo que a frequência de oscilação adotada para os ensaios com oscilação longitudinal do arame foi de 20 Hz. Os resultados em termos de macrografia das seções transversais e aspecto visual das faces dos cordões são apresentadas na Figura 21.

Figura 21 – Faces e macrografias das seções transversais de cordões obtidos com e sem oscilação longitudinal do arame e com alimentação à frente e atrás da tocha TIG. Em (a) alimentação contínua atrás da tocha, (b) alimentação contínua à frente da tocha, (c) oscilação longitudinal atrás da tocha, (d) oscilação longitudinal à frente da tocha.



Fonte: Adaptado de Volkert [9].

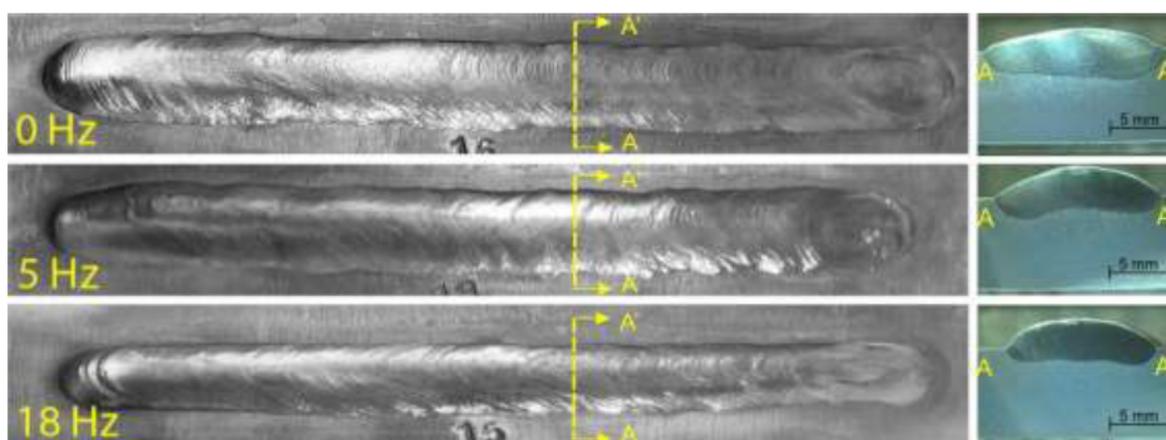
Não é possível, no entanto, realizar uma comparação direta entre os resultados dos ensaios com e sem oscilação longitudinal do arame, uma vez que os aspectos operacionais não foram mantidos constantes nesses ensaios. Entretanto, com uma diferença pouco maior que 10% na corrente de soldagem, sendo essa menor no caso da oscilação longitudinal do arame, Volkert [9] ressalta a penetração rasa e a boa relação entre reforço e largura (abaixo de 0,3) no caso da oscilação longitudinal, condição essa apropriada para aplicações de revestimento. As morfologias dos cordões de solda obtidos por Volkert [9] se opõem àquelas obtidas por Jorge et al. [7], quando se comparam a penetração, reforço e convexidade dos cordões. A inconstância operacional dos ensaios de Volkert [9] pode ser responsável pelas diferenças encontradas, no entanto a reprodução dos ensaios em condições operacionais semelhantes seria necessária para confirmar essa hipótese.

Riffel et al. [5] estudaram os efeitos da oscilação longitudinal do arame na geometria da ZF, microestrutura e resistência a corrosão de soldas realizadas em chapas de aço carbono ASTM A36 com 6,35 mm de espessura e uma camada de revestimento de Inconel 625 de 1 mm. Utilizando a técnica de simples deposição sobre chapa, foram variados a frequência de oscilação (5 e 18 Hz) e a corrente de soldagem (200 e 250 A). Os autores [5] afirmam que a

oscilação longitudinal do arame modificou significativamente as características geométricas da poça de fusão para o maior patamar de corrente de soldagem. Nesse caso, maiores frequências de oscilação resultaram em uma ZF com maior reforço (aumento de até aproximadamente 34%), menor largura (diminuição de até aproximadamente 46%) e menor área fundida (Figura 22), resultando em uma menor diluição - sendo a diluição reduzida em até 22% quando compara-se a frequência de 18Hz com a alimentação contínua. A hipótese levantada no estudo é que o arame “puxa” uma porção de metal fundido da poça de fusão durante o seu movimento de recuo devido à ação da tensão superficial. Isso resultaria em uma ZF com maior reforço e menor largura na comparação entre cordões obtidos com e sem oscilação longitudinal do arame.

Os efeitos de alteração da geometria na poça de fusão não foram significativos para a corrente de soldagem de 200 A, segundo os autores [5]. Tal fato estaria associado à perda de calor do arame para o ambiente durante o seu movimento de recuo. Como a poça de metal fundido associada à condição de maior corrente de soldagem possui maior volume, a extração de calor da poça pela oscilação do arame não teria efeito tão pronunciado como no caso da menor corrente de soldagem, segundo os autores [5]. A extração de calor da poça promovido pela oscilação do arame seria responsável por mitigar os efeitos para a menor energia de soldagem adotada.

Figura 22 – Aspecto superficial e da seção transversal das soldas produzidas com e sem oscilação longitudinal do arame para a corrente de soldagem de 250 A.

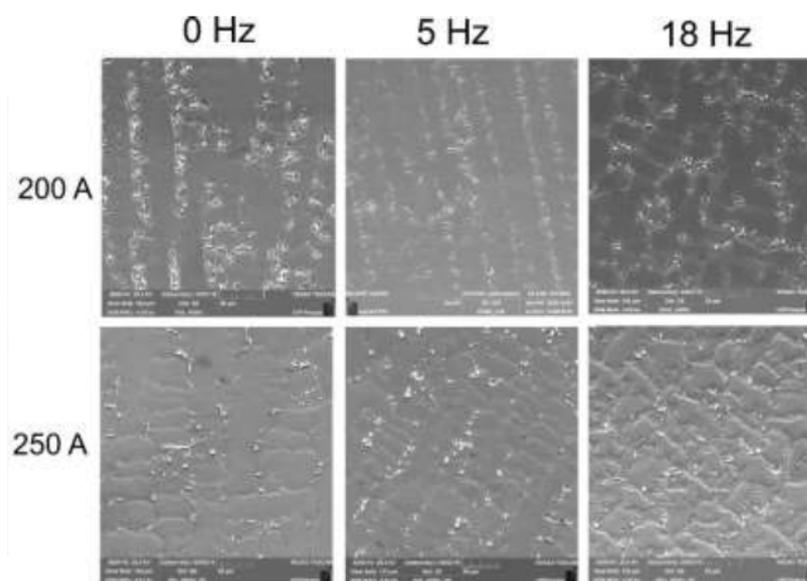


Fonte: Riffel et al. [5].

Com relação aos aspectos microestruturais da ZF (Figura 23), para a corrente de soldagem de 200 A foram relatados grãos dendríticos colunares nos casos de alimentação contínua do arame e oscilação longitudinal do arame em frequência de 5 Hz. Já para a frequência de 18 Hz, os autores [5] relatam uma melhor distribuição de fases intermetálicas

(precipitações ricas em Nb e Ti nas regiões interdendríticas), o que teria sido responsável pela criação de uma microestrutura mais isotrópica. O crescimento colunar e a anisotropia das precipitações, embora existam, são menos pronunciados na condição de corrente de 250 A. A hipótese levantada pelos autores [5] é que devido ao maior tamanho da poça de fusão, a sua solidificação dá origem à grãos mais equiaxiais e uma estrutura isotrópica, já que seu resfriamento é mais lento quando comparado à soldagem com menor corrente. Ainda assim, segundo os autores [5], para a corrente de 250 A houve um efeito significativo de redução no tamanho das precipitações quando compara-se a oscilação longitudinal com frequência de oscilação de 18 Hz e a alimentação contínua do arame.

Figura 23 – Micrografias obtidas por MEV (Microscopia Eletrônica de Varredura) da seção transversal dos corpos de prova.



Fonte: Riffel et al. [5].

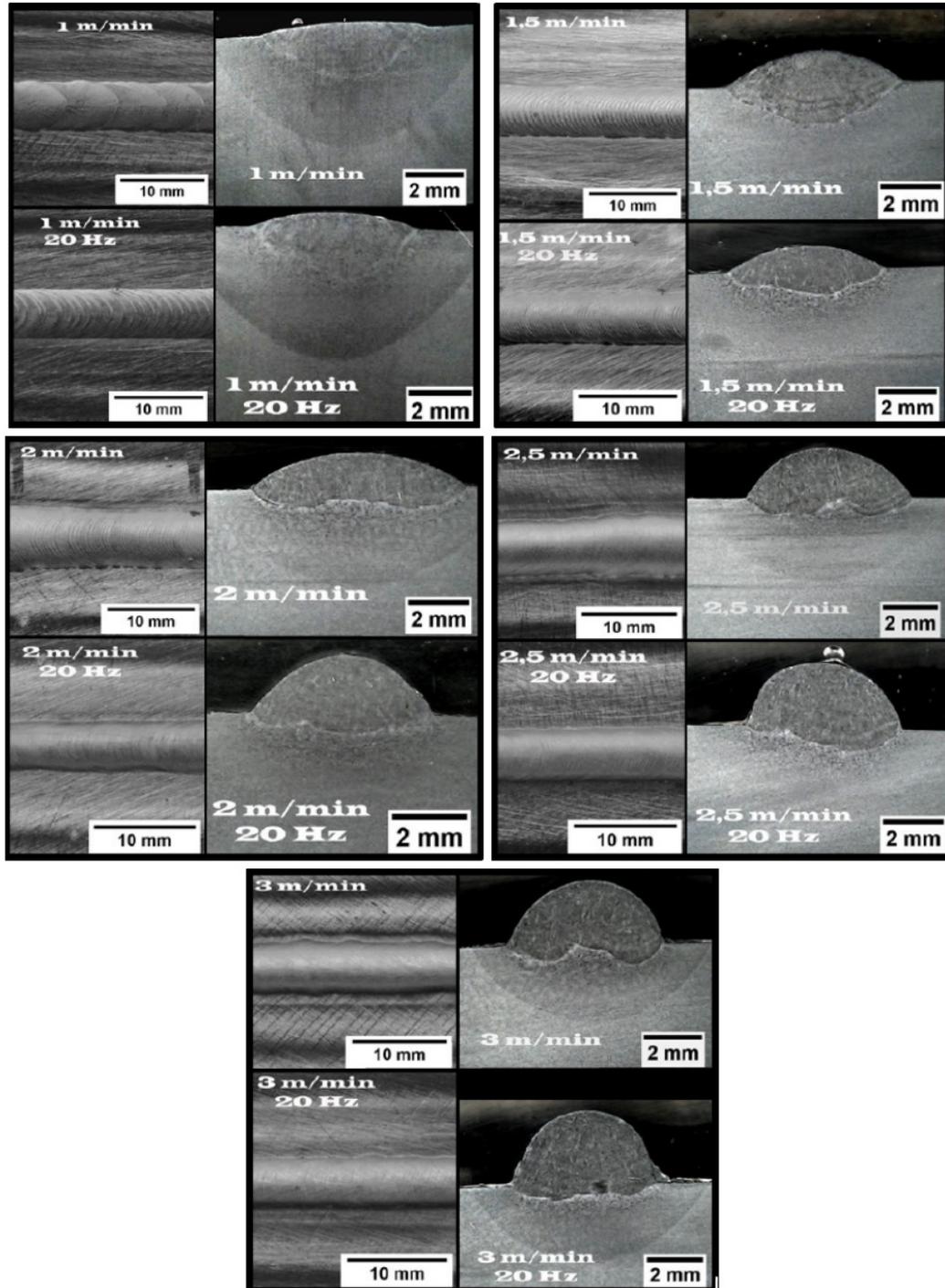
O estudo de Riffel et al. [5] mostrou que para a menor energia de soldagem, associada a corrente de 200 A, a resistência a corrosão de todos os cordões foi similar, dada a similaridade das características geométricas dos cordões. Já para a corrente de 250 A, a oscilação longitudinal do arame resultou em melhora significativa na resistência a corrosão, pois a oscilação do arame reduziu a diluição do elemento ferro.

Em trabalho anterior conduzido no Laboratório de Tecnologia da Soldagem (LTS) [10], ensaios de soldagem utilizando a técnica de simples deposição sobre chapa em corpos de prova de aço carbono SAE 1020 (180x100x6,35 mm) foram realizados. Para uma amplitude de oscilação fixa de 5 mm e frequência de 20 Hz, foi variada a velocidade de alimentação do arame na faixa de 1 a 3 m/min, em intervalos de 0,5 m/min. Esses ensaios foram comparados com

cordões produzidos com as mesmas velocidades de alimentação do arame na condição de alimentação contínua. A Figura 24 apresenta as macrografias das seções transversais e as faces dos cordões obtidas nos ensaios.

Uma diminuição na largura (até aproximadamente 28%) e penetração (até aproximadamente 37%) dos cordões com a oscilação longitudinal do arame foi verificada, para todas as velocidades de alimentação, além do aumento no reforço (até aproximadamente 30%). A diminuição da largura e do reforço foi reportada no estudo [10] como uma alteração leve, já que nem todos os cordões obtidos com oscilação longitudinal do arame apresentaram variações na proporção relatada. Segundo o estudo [10], uma diminuição da área fundida para as velocidades de alimentação do arame de 1 a 2 m/min no caso da oscilação longitudinal foi verificada. Segundo Riffel [39], quando o arame adentra a poça de fusão passando rapidamente pelo arco voltaico, uma parte sólida do material entra em contato com o metal fundido, retirando calor da poça. Este fenômeno não ocorre na alimentação contínua, segundo o autor [39], quando o arame está sob a ação direta do arco elétrico. Assim, os resultados de Riffel [39] mostram que a poça sofre uma diminuição de temperatura quando a oscilação longitudinal do arame é empregada, o que pode ter sido responsável pela diminuição do tamanho da poça observada pelo estudo [10]. Os resultados reportados no estudo [10] estão de acordo com o obtido por Jorge et al. [7] em termos da diminuição da largura, aumento do reforço e aumento da convexidade dos cordões ao aplicar a oscilação longitudinal do arame. Já em termos da penetração, os estudos divergem. Já em relação ao estudo de Volkert [9], o trabalho está de acordo no aspecto penetração.

Figura 24 – Macrografias e faces dos cordões produzidos com diferentes velocidades de alimentação do arame na condição de alimentação contínua e com oscilação longitudinal (amplitude de oscilação de 5 mm e frequência de 20 Hz).

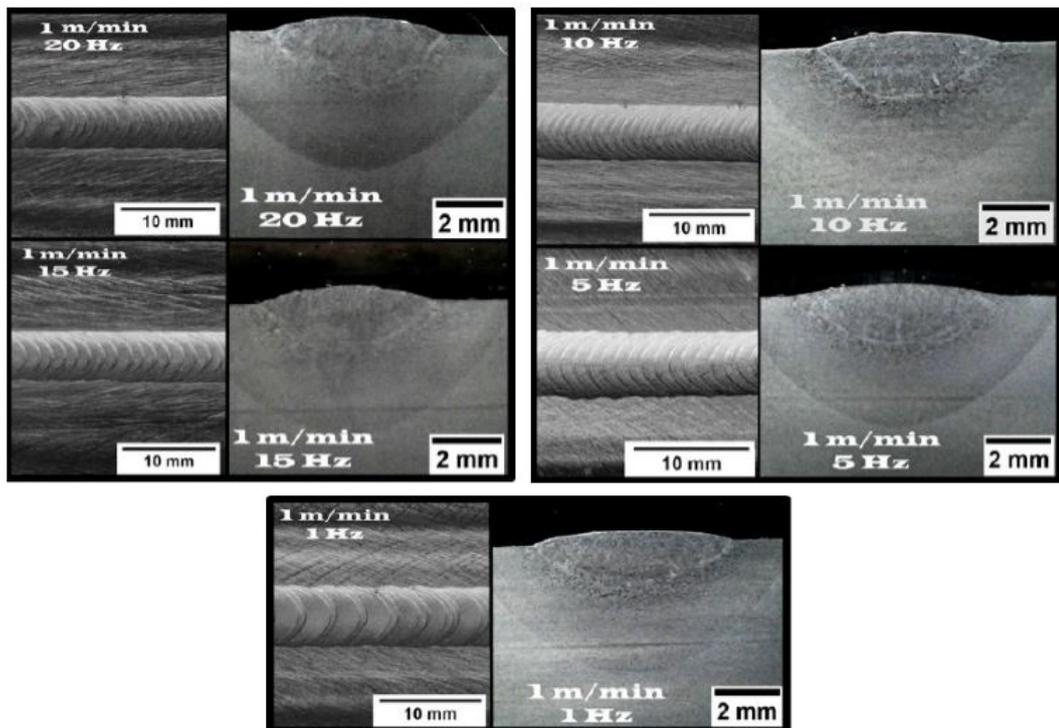


Fonte: Martins [34].

Ainda, uma segunda avaliação foi realizada no estudo [10] mantendo fixa a amplitude de oscilação em 5 mm, a velocidade de alimentação do arame em 1 m/min e utilizando as frequências de 1, 5, 10, 15 e 20 Hz. Macrografias das seções transversais e faces dos cordões

são apresentadas na Figura 25. Uma diminuição na largura (até aproximadamente 17%) e na área fundida (até aproximadamente 26%) dos cordões com o aumento da frequência de oscilação foi percebida. Além disso, não foram identificadas variações na penetração em função da frequência adotada. O estudo [10] levanta a hipótese de que a diminuição da largura do cordão aconteceria por ocasião da transferência de gotas de metal fundido de menor volume à poça de fusão. A diminuição do volume das gotas de metal transferidas ocorreria no sentido das maiores frequências de oscilação. Com a diminuição da largura, ocorreria também a diminuição da área fundida, apesar da velocidade de alimentação do arame ter sido mantida constante em todos os ensaios.

Figura 25 – Macrografias e faces dos cordões produzidos com diferentes frequências de oscilação do arame (amplitude de oscilação de 5 mm).



Fonte: Martins [34].

Um resumo dos efeitos abordados na literatura pesquisada acerca da oscilação longitudinal do arame no processo de soldagem TIG é apresentado no Apêndice A do presente estudo.

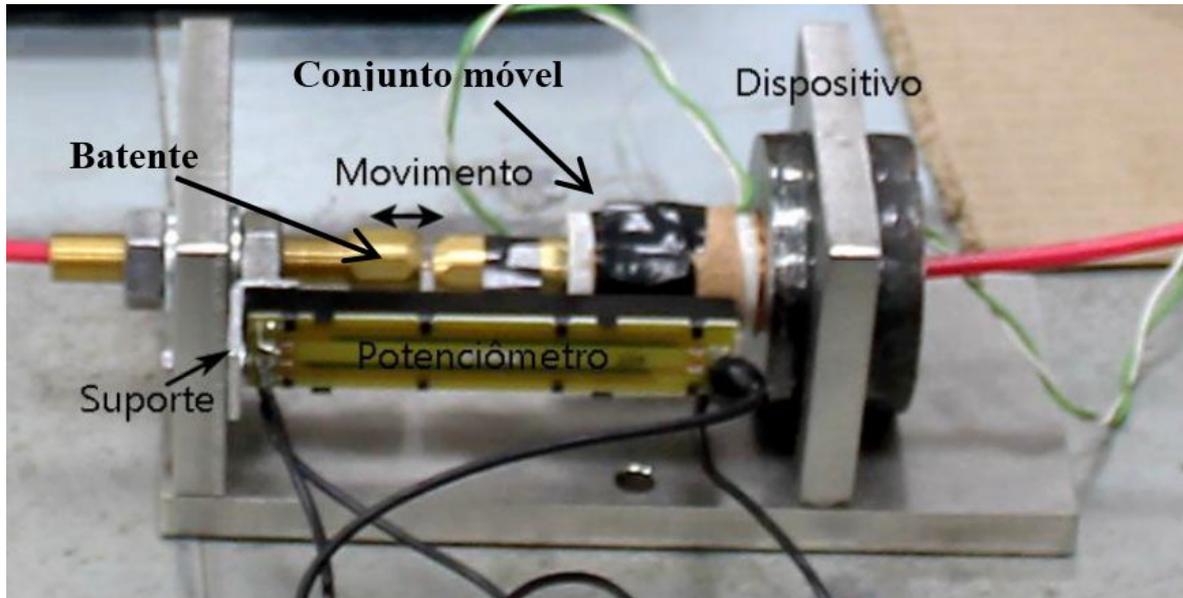
3 HISTÓRICO DO DESENVOLVIMENTO DA OSCILAÇÃO LONGITUDINAL DE ARAME APLICADA AO PROCESSO DE SOLDAGEM TIG NO LTS

3.1 PRIMEIRO PROTÓTIPO DE DISPOSITIVO DESENVOLVIDO NO LTS

Ante ao exposto até então, considerando a oscilação longitudinal do arame no processo de soldagem TIG como um tema contemporâneo e de íntimo interesse da academia, no ano de 2018, o Laboratório de Tecnologia da Soldagem (LTS) iniciou trabalhos na linha de pesquisa associada a oscilação longitudinal do arame aplicada ao processo de soldagem TIG. Para tal, iniciou-se o desenvolvimento de tecnologia própria, assim como outros grandes grupos de pesquisa em soldagem no Brasil. Nesse contexto, em trabalho anterior conduzido no LTS [10] foi desenvolvida uma primeira versão de dispositivo, com o objetivo maior de avaliar o conceito para a tecnologia desenvolvida.

Na primeira versão do dispositivo (Figura 26), o movimento oscilatório é promovido pela interação entre o campo magnético de um ímã permanente e o campo magnético variável de um solenoide envolto em material ferro magnético. Fixo ao conjunto móvel - solenoide, um trecho de conduíte que vem do tracionador de arame oscila periodicamente na mesma direção de alimentação do arame, e a amplitude de oscilação é controlada manualmente pela regulagem da distância entre o conjunto móvel e um batente. A partir do batente, segue um trecho final do conduíte, ajustado no bico direcionador. Como o conduíte fixo ao batente é estacionário em relação ao trecho oscilante que vem do tracionador, obtém-se o efeito físico de aumento instantâneo do comprimento de conduíte percorrido pelo arame, sendo o movimento de oscilação transmitido pelo conduíte ao arame por atrito.

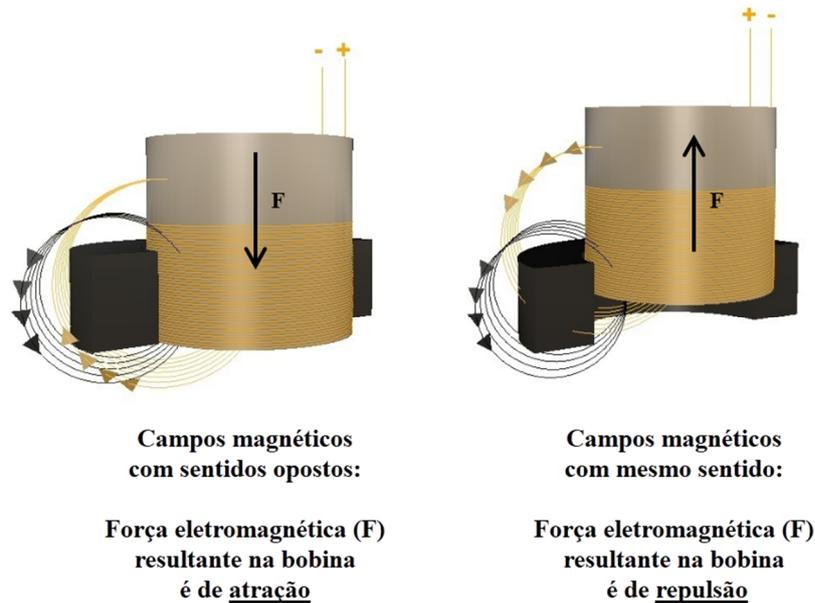
Figura 26 – Primeiro protótipo de dispositivo para a oscilação longitudinal do arame no processo TIG desenvolvido no LTS.



Fonte: Laboratório de Tecnologia da Soldagem (LTS) [10].

De fato, o princípio físico que rege o movimento mecânico da primeira versão do dispositivo é conhecido e de fácil entendimento. O ímã permanente produz um campo magnético com direção constante que é conduzido preferencialmente pelas peças ferromagnéticas em seu entorno. Tal campo magnético atravessa as espiras da bobina móvel (solenóide). Assim, uma vez estando no interior de um campo magnético constante, a bobina móvel está sujeita a ação de uma força eletromagnética, quando percorrida por corrente elétrica. Esta força é proporcional a intensidade do campo magnético produzido pelo ímã permanente e pela intensidade da corrente elétrica que percorre a bobina móvel, sendo responsável, portanto, pela movimentação da bobina móvel e das peças fixas a mesma. O sentido desta força depende da polaridade da corrente elétrica que percorre a bobina. Portanto, a interação entre os campos magnéticos da bobina e do ímã permanente ora resulta em uma força de atração entre a parte estática e móvel, ora em repulsão. Como o ímã permanente é estático, essa força resulta na movimentação da bobina e, por consequência, do componente onde está fixado o conduto proveniente do tracionador de arame. Uma representação da interação entre os campos magnéticos, bem como da movimentação da bobina é apresentada na Figura 27.

Figura 27 – Interação entre campos magnéticos do ímã permanente e da bobina e força resultante na bobina.

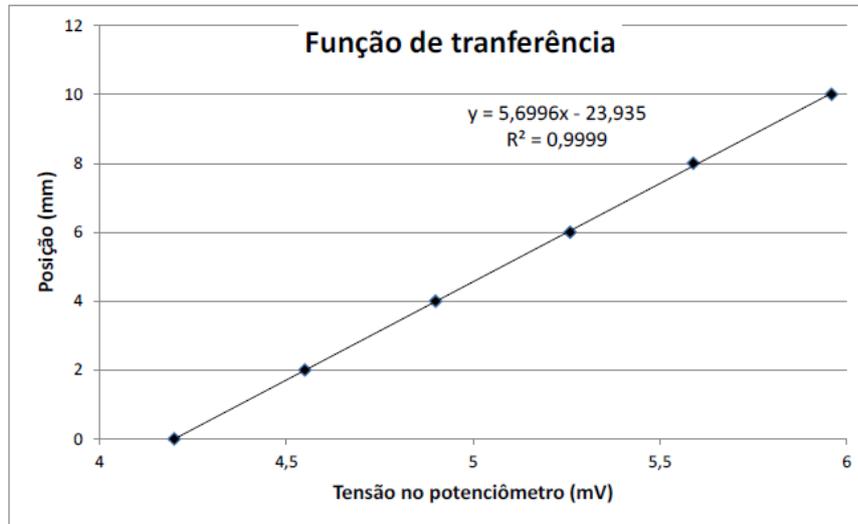


Fonte: Elaborado pelo autor.

A caracterização deste primeiro protótipo de dispositivo foi dividida em três principais etapas: obtenção da função de transferência que relaciona a posição do conjunto móvel e a tensão de saída de um potenciômetro linear, estabelecimento das frequências limite de funcionamento para cada condição de amplitude e determinação das velocidades e acelerações de avanço e retorno do conjunto móvel em função da amplitude de oscilação.

Um potenciômetro linear de $10\text{ k}\Omega$ foi utilizado como ferramenta para obtenção de curvas da posição do conjunto móvel em função do tempo. Essas curvas possibilitaram as demais etapas da caracterização do dispositivo. Aplicando-se uma tensão de entrada nos terminais do potenciômetro, para cada posição estabelecida foi obtida como resposta a respectiva tensão de saída. Assim, fixando o potenciômetro ao conjunto de forma alinhada (Figura 26), com o intuito de realizar seu movimento de forma acoplada e paralela ao dispositivo sem gerar resistências significativas, pôde-se realizar o teste de verificação da função que descreve o movimento do conjunto móvel, utilizando-se um osciloscópio como ferramenta para medição da tensão de saída. A Figura 28 apresenta a função de transferência obtida.

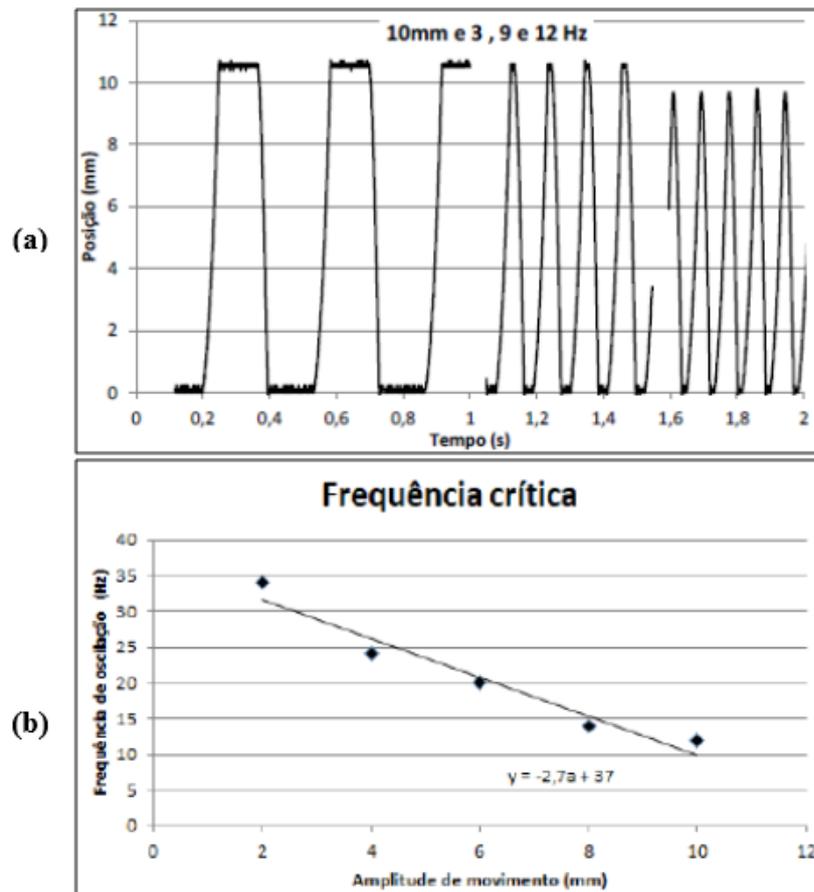
Figura 28 – Função de transferência utilizada para descrever a posição do conjunto móvel do protótipo no tempo.



Fonte: Laboratório de Tecnologia da Soldagem (LTS) [10].

Considerando o aspecto construtivo do dispositivo e a regulação da amplitude de oscilação de forma manual, foi determinado um intervalo de amplitudes entre 2 e 10 mm, com intervalos de 2 mm. Para cada condição de amplitude de oscilação, foi investigada a frequência limite de funcionamento, ou seja, a frequência limite na qual a amplitude não é mais atingida ou o comportamento deixa de atender ao esperado durante a movimentação. Com a metodologia empregada, fazendo uso do potenciômetro e da função de transferência obtida, foi obtida a variação da posição do conjunto móvel no tempo. A análise dessa variação permitiu identificar a frequência limite de funcionamento para cada amplitude, como mostra a Figura 29a para a amplitude de 10 mm, cuja frequência limite foi de 12 Hz. A Figura 29b mostra a relação entre a amplitude e a frequência limite de funcionamento para todas as amplitudes analisadas.

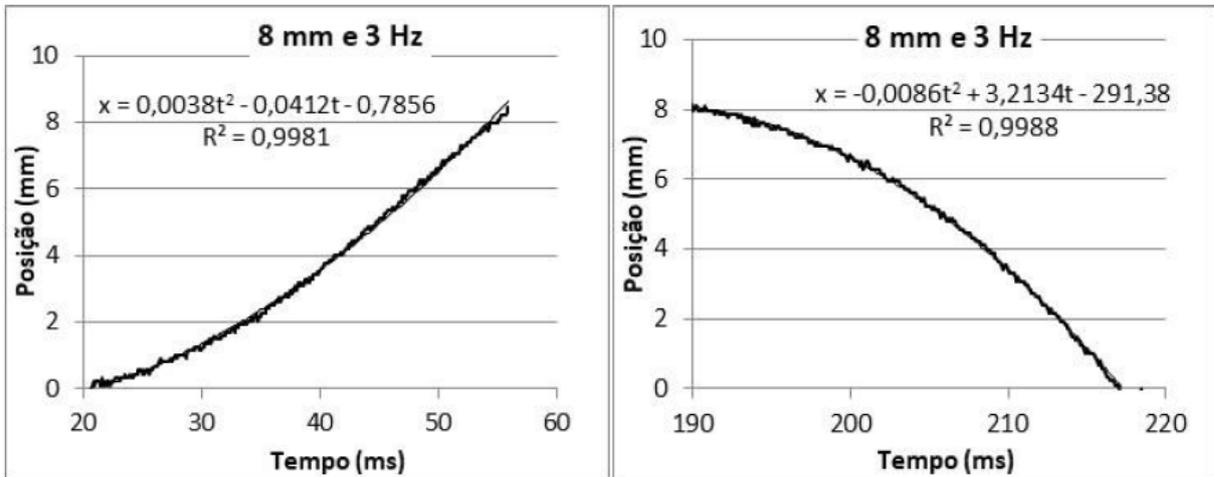
Figura 29 – Investigação realizada a fim de identificar a frequência limite de funcionamento para cada amplitude. Em (a) análise para a amplitude de oscilação de 10 mm, (b) relação entre amplitude e frequência limite para todas as amplitudes.



Fonte: Laboratório de Tecnologia da Soldagem (LTS) [10].

Empregando a mesma metodologia, o autor [10] obteve as curvas de avanço e retorno do conjunto móvel para cada uma das amplitudes analisadas, mantendo a frequência fixa em 3 Hz. A Figura 30 apresenta as curvas de avanço e retorno obtidas para a amplitude de 8 mm e mostra a adequação de um polinômio de grau 2 a cada uma delas.

Figura 30 – Gráficos que descrevem o movimento de avanço e retorno do dispositivo para a amplitude de 8 mm e frequência de 3 Hz obtidos.



Fonte: Laboratório de Tecnologia da Soldagem (LTS) [10].

Mediante a adequação dos polinômios de segundo grau às curvas de posição, é apresentado no estudo [10] os polinômios de primeiro grau que descrevem as velocidades do conjunto móvel (aplicando a técnica de derivação). Mediante a reaplicação da operação de derivação, as acelerações de avanço e retorno foram determinadas no estudo [10], como mostra a Tabela 1.

Tabela 1 - Relação de equações derivadas das funções de posição em função do tempo obtidas (equações de velocidade e constantes de aceleração).

Amplitude (mm)	Função velocidade de avanço $v = dx/dt$ (mm/ms)	Função velocidade de retorno $v = dx/dt$ (mm/ms)	Função aceleração no avanço $a = dv/dt$ (mm/ms ²)	Função aceleração no retorno $a = dv/dt$ (mm/ms ²)
10	$0,00646t - 0,011$	$-0,0152t + 2,525$	0,0064	-0,0152
8	$0,0076t - 0,041$	$-0,0172t + 3,21$	0,0076	-0,0172
6	$0,0124t - 0,229$	$-0,024t + 4,53$	0,0124	-0,0240
4	$0,0118t - 0,28$	$-0,0201t + 3,88$	0,0118	-0,0201
2	$0,0118t - 0,168$	$-0,0242t + 4,406$	0,0118	-0,0242

Fonte: Laboratório de Tecnologia da Soldagem (LTS) [10].

Considerando que a corrente aplicada na bobina é independente da amplitude de oscilação adotada, logo a intensidade e interação entre os campos magnéticos também são. Ainda, sabe-se que a massa do dispositivo também não varia com a amplitude. Desta forma, considerando que a força resultante sobre as espiras da bobina é diretamente proporcional ao produto da aceleração com a massa do dispositivo, o estudo [10] relata uma expectativa pela obtenção de acelerações também independentes da amplitude de oscilação. De fato, isso não foi observado no estudo [10]. Durante os ensaios foi constatada uma grande sensibilidade ao

movimento provinda do dispositivo, por possuir uma baixa força resultante da interação entre os campos magnéticos, segundo o autor [10]. O estudo [10] ressalta menores níveis de aceleração durante o avanço do conjunto móvel, em comparação com o movimento de recuo. Isso pode estar associado diretamente ao aspecto construtivo do dispositivo. Conforme o conjunto móvel avança, pode ser que um menor número de espiras da bobina estivesse sujeito ao campo magnético do ímã permanente, diminuindo a interação entre os campos magnéticos e, conseqüentemente, a força eletromagnética resultante na bobina, reduzindo a aceleração no avanço. Quando o conjunto móvel se desloca na direção de recuo, um número crescente de espiras da bobina passa a adentrar o campo magnético do ímã permanente, o que poderia resultar em maior força eletromagnética resultante na bobina, aumentando a aceleração. Além disso, o estudo [10] ressalta que qualquer pequena variação de fator de carga aplicada possuía influência no comportamento do dispositivo. Isso foi observado, por exemplo, pela posição do condúite acoplado ao conjunto móvel. Foi relatado no estudo [10] que a geração de diferentes níveis de atrito entre o arame e a superfície interior do condúite, pelo próprio posicionamento do condúite levavam a uma mudança no comportamento do dispositivo.

Nesse sentido, sentiu-se a necessidade de se desenvolver um segundo protótipo, com o mesmo princípio físico de funcionamento, uma vez que este foi consolidado pelo estudo [10]. Esta segunda versão sendo desenvolvida de maneira a se adotar medidas para mitigar as limitações observadas na primeira versão do dispositivo. Tal necessidade fomentou o presente trabalho.

3.2 CONCEPÇÃO DA VERSÃO FINAL DO DISPOSITIVO

A primeira etapa do presente trabalho é a concepção da segunda versão do dispositivo para a oscilação longitudinal do arame no processo de soldagem TIG, baseando-se no primeiro protótipo desenvolvido no LTS, cujo conceito de funcionamento já foi consolidado. Das tecnologias em desenvolvimento conhecidas para este fim, nenhuma emprega conceito semelhante. Neste contexto, o protótipo de Jorge et al. [7] é aquele que mais se assemelha ao dispositivo aqui proposto, devido ao seu acionamento também ser eletromagnético.

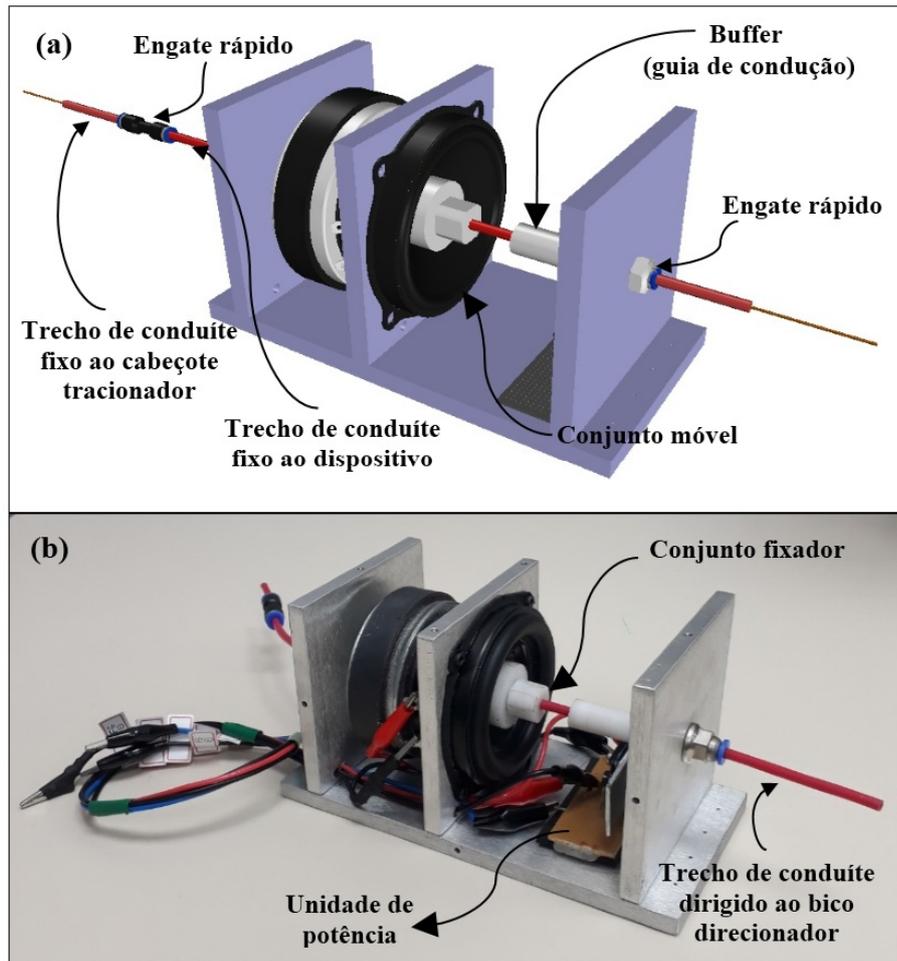
Foi utilizado um transdutor eletromecânico comercial a fim de promover o movimento oscilatório. A opção pela utilização de um transdutor eletromecânico comercial (do tipo alto-falante), em detrimento do desenvolvimento de um aparato com o mesmo princípio de funcionamento se deu pois, entende-se que o transdutor eletromecânico comercial possui um

controle produtivo que atribui a ele uma excelente confiabilidade e bom desempenho, aspectos esses que demandariam grande esforço para serem iguais em um aparato de desenvolvimento próprio. Além disso, com a utilização do transdutor eletromecânico (através de uma seleção adequada) foi possível mitigar o efeito de pequena força eletromagnética resultante da interação entre os campos magnéticos observada na primeira versão do dispositivo.

Assim como na primeira versão, o movimento de oscilação do dispositivo tem a mesma direção da alimentação do arame. Isso faz com que a amplitude de oscilação da ponta do arame seja muito próxima da amplitude de oscilação do dispositivo resultante das interações magnéticas produzidas pelo transdutor. Além disso, a força eletromagnética é utilizada em sua totalidade para movimentar o condúite e o arame, por consequência da força de atrito entre eles. Já no dispositivo de Jorge et al. [7], o movimento oscilatório é produzido por consequência da flexão do conjunto condúite e arame. Desta forma, entende-se que parte da força eletromagnética é perdida na deformação elástica do conjunto, o que torna o princípio de oscilação menos eficiente. Além disso, com relação a aspectos construtivos, o dispositivo de Jorge et al. [7] necessita de 2 propulsores (cada conjunto de bobina e ímã permanente) dispostos transversalmente em relação a direção de alimentação do arame. Isso atribui ao dispositivo maiores massa e dimensão em termos de largura. No entanto, o dispositivo de Jorge et al. [7] permite a regulagem da amplitude de oscilação remotamente, o que não acontece na primeira versão do dispositivo desenvolvido pelo LTS. Na sua segunda versão, ambas a frequência e amplitude de oscilação poderão ser reguladas remotamente.

Entendido o princípio físico que rege o movimento oscilatório observado no dispositivo concebido neste trabalho, relata-se a sua transmissão ao arame de adição. Um conjunto fixador (Figura 31b) é encarregado de anular o movimento relativo entre a parte móvel e o trecho de condúite fixo ao cabeçote tracionador (Figura 31a). O trecho de condúite atravessa o transdutor eletromecânico por um furo passante concêntrico em sua estrutura, se encontrando com o conjunto fixador que realiza o seu travamento com um sistema do tipo pinça, sendo que o conjunto fixador é fixo ao conjunto móvel do transdutor eletromecânico. Uma vez fixado o condúite ao conjunto móvel do transdutor, o movimento de oscilação é transmitido ao arame por atrito.

Figura 31 – Detalhamento mecânico do dispositivo proposto e comparação com o dispositivo construído. Em (a) dispositivo projetado, (b) dispositivo construído.



Fonte: Elaborado pelo autor.

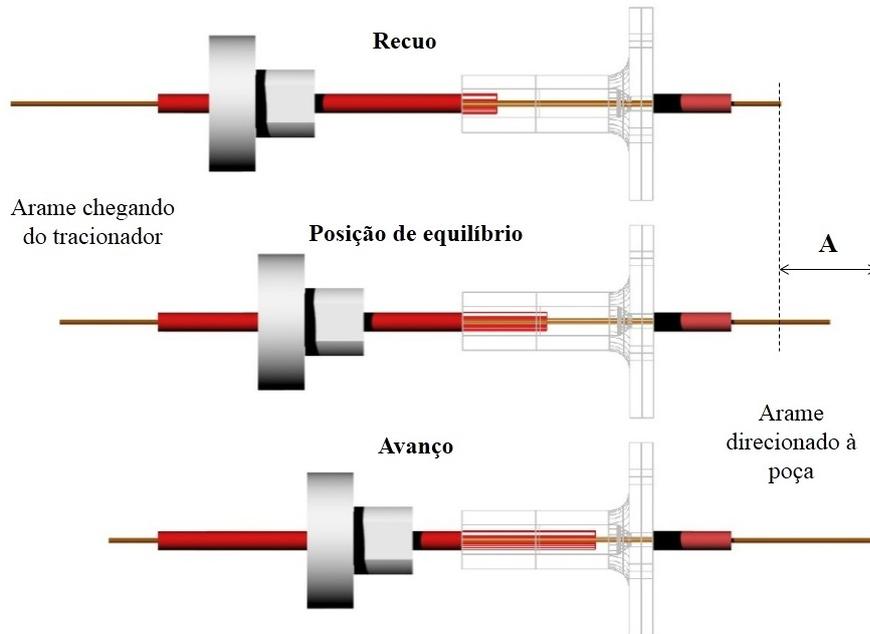
Uma guia de condução, que funciona como um *buffer* (Figura 31a), absorve a amplitude de oscilação do trecho de conduíte fixo ao dispositivo (Figura 31a), permitindo que haja um movimento relativo entre ele e o trecho de conduíte que se destina ao bico direcionador (Figura 31b). Isso faz com que se observe um aumento instantâneo do comprimento de conduíte percorrido pelo arame e, portanto, a variação da posição da ponta do arame (Figura 32).

Ainda, engates rápidos foram utilizados com o objetivo de tornar o dispositivo versátil, permitindo desacoplá-lo rapidamente da bancada de trabalho. Furações na tampa do dispositivo permitem a circulação do ar movimentado pelo conjunto móvel do transdutor eletromecânico durante as suas oscilações, aumentando ainda a eficiência do resfriamento convectivo da eletrônica de potência que se posiciona internamente ao dispositivo.

No que se refere ao acionamento do dispositivo, para que o transdutor assuma posições fixas de avanço e recuo por um determinado intervalo de tempo em torno de uma posição de equilíbrio, é necessário fornecer a ele um sinal retangular. A atuação na amplitude e frequência

desse sinal retangular permite a regulagem da amplitude e frequência de oscilação do dispositivo.

Figura 32 – Aumento instantâneo do comprimento de conduíte percorrido pelo arame e variação da posição da ponta do arame. Onde “A” significa “amplitude de oscilação”.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Esta segunda versão do dispositivo, quando comparada a primeira, além de possuir maior robustez na movimentação do conjunto conduíte e arame, atribuída pela utilização do transdutor eletromecânico comercial, e de usufruir de regulagem remota de amplitude de oscilação, possui uma particularidade que não é encontrada em nenhuma outra tecnologia já desenvolvida (ou em desenvolvimento) para a oscilação longitudinal do arame no processo de soldagem TIG de que se tem conhecimento. Trata-se do modo de operação controlado.

Atualmente, toda tecnologia encontrada na literatura para a oscilação longitudinal do arame no processo de soldagem TIG trabalha em um modo de operação nomeado nesse estudo como modo padrão. Nesse modo, são estipulados uma frequência e uma amplitude de oscilação para o arame, que trabalha oscilando periodicamente de acordo com os parâmetros regulados. É possível, ainda, encontrar estudos que permitem a regulagem de diferentes tempos para que o arame permaneça no avanço ou recuo, como o estudo de Silva et al. [6], sendo que o arame de adição continua oscilando periodicamente com frequência e amplitude fixas.

A segunda versão do dispositivo, permite além da operação no modo padrão, a operação em um modo com controle ativo de posicionamento da ponta do arame, chamado de

modo controlado. Estudos preliminares do LTS mostraram que quando a ponta do arame de alimentação encontra-se fora do arco voltaico, a diferença de potencial entre o eletrodo de tungstênio e o arame é nula. Quando o arame toca a poça de fusão, a leitura de tensão se iguala a tensão do arco voltaico. Por fim, quando o arame encontra-se no arco, porém sem tocar a poça de fusão, a diferença de potencial assume um valor intermediário, normalmente um pouco acima da metade da tensão de arco. Dito isso, com a medida contínua da diferença de potencial entre eletrodo e arame, tem-se a posição da ponta do arame na região do arco voltaico/poça de fusão. Em resposta a esse sinal de referência, quando operando no modo controlado, o dispositivo é capaz de atuar no posicionamento da ponta do arame ativamente, permitindo alcançar diferentes condições operacionais de transferência de material para a poça de fusão.

3.2.1 Modos de operação

Além da possibilidade de configurar o dispositivo para manter o seus parâmetros de oscilação longitudinal constantes durante as soldagens, ou permitir a alteração desses parâmetros de maneira remota durante os procedimentos (modo de operação padrão), vislumbra-se a operação no modo controlado.

O modo controlado permite duas opções de funcionamento. Na primeira, com o objetivo de operar com o arame enterrado na poça, toda vez que a unidade de controle acusa que a ponta do arame toca a poça de fusão, um movimento de avanço com determinada amplitude (determinada pelo usuário, amplitude de avanço - A_a) e tempo de duração (chamado de tempo no avanço - t_a), também regulada pelo usuário, é realizado. Assim, percebe-se que mesmo que seja regulada uma velocidade de alimentação do arame inferior àquela necessária para que o arame esteja enterrado na poça de fusão, torna-se possível trabalhar nessa condição operacional. Dessa forma tem-se a possibilidade de deposição de uma quantidade inferior de material, já que é possível trabalhar com menores velocidades de alimentação de arame, porém, com a ponta do arame entrando na poça de fusão.

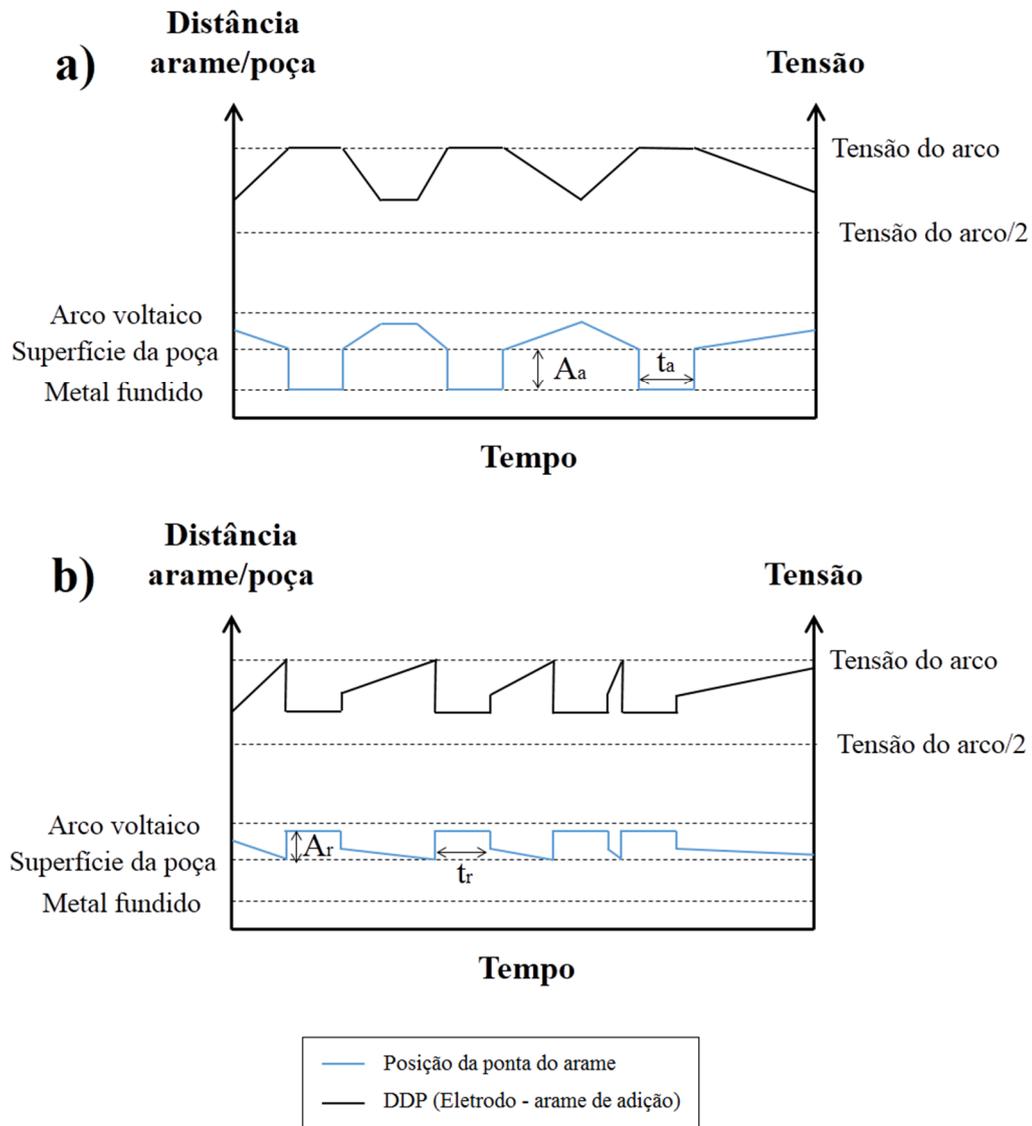
Por outro lado, na segunda forma, identificando-se o contato entre a ponta do arame e a poça de fusão, o dispositivo realiza um movimento instantâneo de recuo, garantindo que o arame trabalhe numa condição sem contato contínuo com a poça. A amplitude de recuo (A_r), bem como o tempo no recuo (t_r) são também regulados pelo usuário. Nessa condição operacional, vislumbra-se a possibilidade de trabalhar com a transferência de metal intermitente para a poça de fusão, porém com maior velocidade de alimentação do arame do que aquela que

seria regulada para a transferência intermitente natural, ou seja, sem a atuação do dispositivo. Dessa forma, uma maior quantidade de material seria depositada na poça de fusão.

É intuitivo que para ambos os modos de operação controlados existirão intervalos de velocidades de alimentação do arame bem definidos para o devido funcionamento do dispositivo. Na primeira configuração, a velocidade de alimentação não poderá ser tão pequena ao ponto de não permitir o mergulho da ponta do arame na poça de fusão quando o dispositivo atua no avanço do arame, mas também não deve ser tão grande de maneira que o arame já trabalhe enterrado sem a atuação do dispositivo – que teria, então, sua função inutilizada. A mesma linha de raciocínio se aplica a segunda forma de configuração do modo controlado. A velocidade de alimentação do arame não pode ser tão grande ao ponto de que quando o dispositivo atua no movimento de recuo a ponta do arame permaneça mergulhada na poça, nem tão pequena de modo a não permitir o contato entre ponta do arame e poça de fusão.

A Figura 33 ilustra uma expectativa de comportamento, desconsiderando a alimentação contínua de material que é promovida pelo cabeçote tracionador, da variação da distância entre a ponta do arame e poça de fusão em função do tempo, para ambas as configurações do modo de operação controlado. Além disso, a Figura 33 permite relacionar os movimentos de avanço e recuo com o sinal de referência lido pela unidade de controle - diferença de potencial entre eletrodo de tungstênio e arame.

Figura 33 – Representação da variação da distância entre a ponta do arame e a poça de fusão no modo de funcionamento controlado. Em (a) configuração com o arame enterrado na poça, (b) configuração com o arame fora da poça.

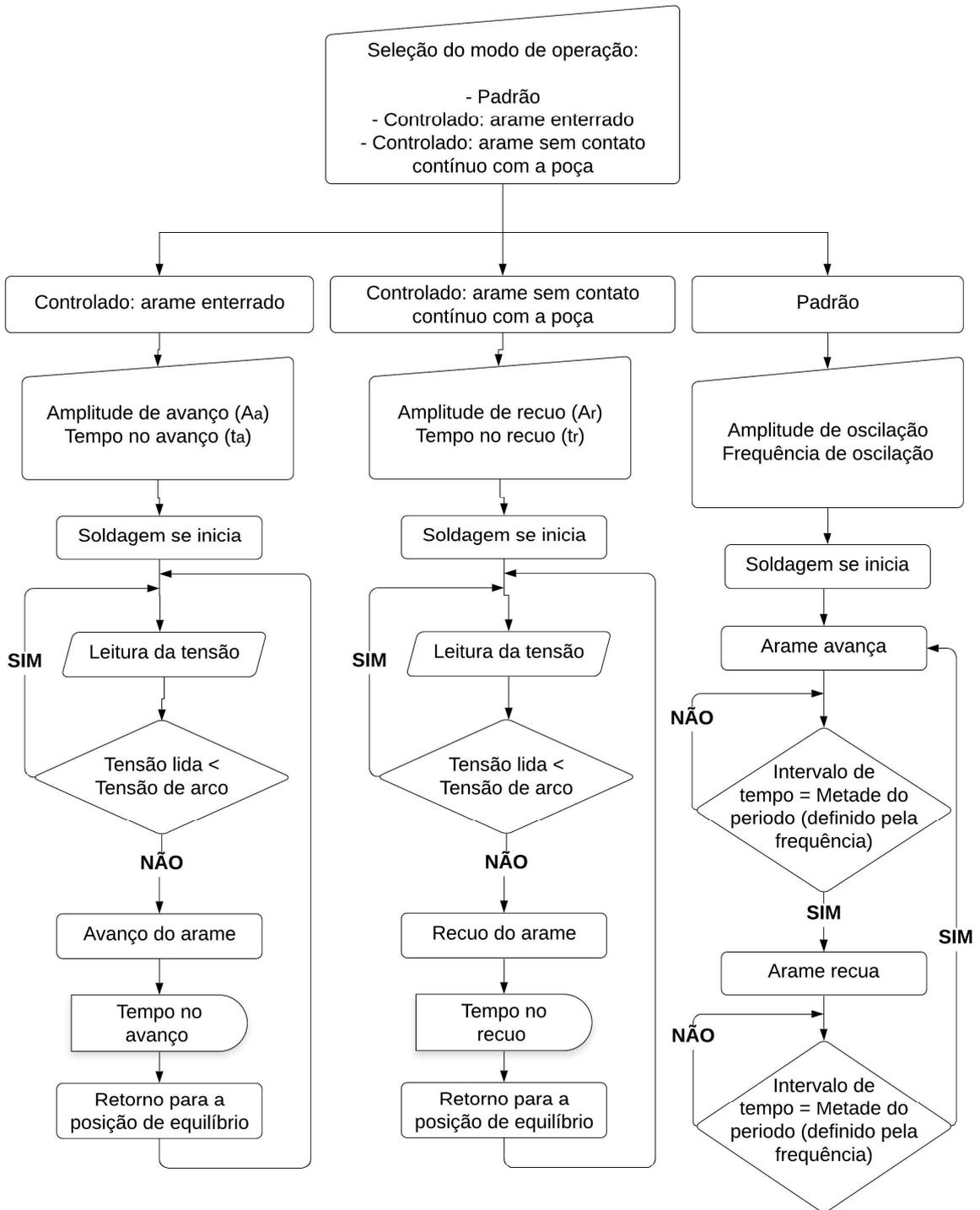


Fonte: Elaborado pelo autor.

Ressalta-se que a condição operacional adotada tem efeito expressivo sobre as características geométricas dos cordões de solda, como será visto adiante no atual trabalho. Mitigar a correlação entre a condição operacional e a quantidade de material adicionado à poça de fusão é uma característica do modo de operação controlado. Ainda, como pode ser percebido na Figura 33, no modo de operação controlado as oscilações da ponta do arame não são cíclicas, mas dependem do sinal de referência de tensão lido continuamente. Já no modo de operação padrão, no qual não existe nenhum controle implementado, o movimento é periódico. A Figura

34 apresenta um fluxograma que representa o funcionamento de cada modo de operação do dispositivo.

Figura 34 – Fluxograma dos modos de operação do dispositivo concebido.



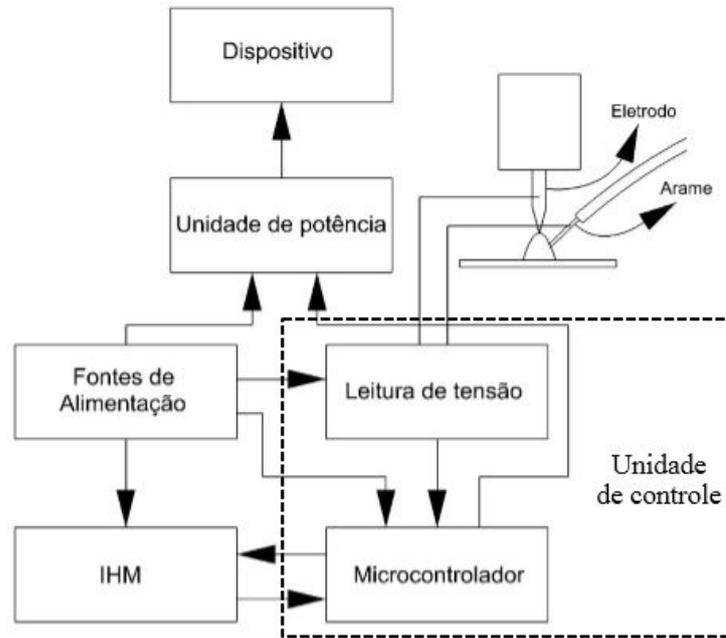
Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.2 Hardware

Para viabilizar o acionamento do dispositivo e a sua devida operação, foi concebido um hardware composto por 3 unidades. A primeira é a unidade de potência, localizada internamente no dispositivo, e incumbida de amplificar o sinal recebido da unidade de controle. A geração do sinal retangular que define a posição do conjunto móvel do dispositivo é função da unidade de controle. O microcontrolador utilizado para gerar o sinal retangular (ATmega328) não possui saída analógica, portanto foi utilizado para esse fim o conversor digital analógico MCP4725, com 12 bits de resolução. Como o microcontrolador utilizado tem a capacidade de fornecimento de tensão de 0 a 5 V, depois de gerado pelo microcontrolador e convertido em sinal analógico, o sinal recebe um offset de 2,5 V, para que o transdutor possa realizar tanto o movimento de avanço quanto de recuo. Além da geração do sinal para operação no modo padrão, é função da unidade de controle a leitura da diferença de potencial entre eletrodo de tungstênio e arame, além de todo o controle necessário para a operação no modo controlado. Por fim, a Interface Homem Máquina (IHM) permite que as variáveis da oscilação longitudinal do arame sejam reguladas antes e/ou durante as soldagens.

Para a alimentação da unidade de potência, duas fontes chaveadas de 12V/5A foram utilizadas para construir uma fonte simétrica $\pm 12V$. A alimentação do microcontrolador foi realizada utilizando-se uma das fontes que compõem a fonte simétrica. Na unidade de controle, para garantir a integridade da parte eletrônica do dispositivo, a aquisição de tensão é isolada eletricamente do restante do sistema através de um optoacoplador linear. As unidades de controle e IHM, bem como a fonte simétrica, compõem um painel independente à parte mecânica do dispositivo, sendo a comunicação promovida por cabeamento. A Figura 35 representa as unidades discutidas e a comunicação entre elas.

Figura 35 – Diagrama de blocos da versão final do dispositivo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para o devido funcionamento do dispositivo concebido nesse estudo, foi necessário realizar a calibração da amplitude de oscilação, que é função da tensão fornecida pelo microcontrolador. Portanto, apresenta-se inicialmente no capítulo que se segue o procedimento de calibração do dispositivo.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 CALIBRAÇÃO DO DISPOSITIVO

Visto que na presente versão de dispositivo a amplitude de oscilação não é simplesmente definida pela distância entre o conjunto móvel e um batente, como na primeira versão desenvolvida [10], foi necessário calibrar essa variável. Portanto, foi necessário encontrar os valores de tensão a serem fornecidos pelo microcontrolador que resultassem num deslocamento do transdutor eletromecânico que estivesse de acordo com o regulado na IHM. O intervalo de regulagem da amplitude de oscilação na IHM foi definido como de 1 a 10 mm, com resolução de 1 mm. Desta forma, para cada regulagem de amplitude de oscilação, 2 níveis de tensão precisaram ser calibrados via software para gerar o sinal retangular: a tensão de avanço e a tensão de recuo. No sinal retangular, quando imposta a tensão de avanço, o transdutor se movimenta de tal modo a se aproximar da guia de condução (buffer). Quando imposta a tensão de recuo, o movimento é no sentido oposto.

O intervalo de frequência de oscilação definido para o dispositivo foi de 1 a 30 Hz, com resolução de 1 Hz. Como a frequência de oscilação depende da frequência do sinal retangular que é entregue ao transdutor eletromecânico, sendo essa definida via software, não foi necessário realizar a calibração dessa variável, apenas fez-se a conferência entre valores regulados e medidos.

Para realizar a calibração da amplitude de oscilação foi utilizada uma câmera de alta velocidade modelo Photron Fastcam Mini UX50-160K. Inicialmente, fixou-se o dispositivo em uma bancada e a câmera foi posicionada a fim de filmar o deslocamento do conjunto fixador, ou seja, a pinça onde o condúite está fixo. Nessa primeira abordagem o dispositivo estava posicionado com sua base paralela à bancada e não havia arame (material de adição) passado por sua estrutura, como pode ser verificado na Figura 36.

Figura 36 – Bancada utilizada para a calibração inicial do dispositivo.



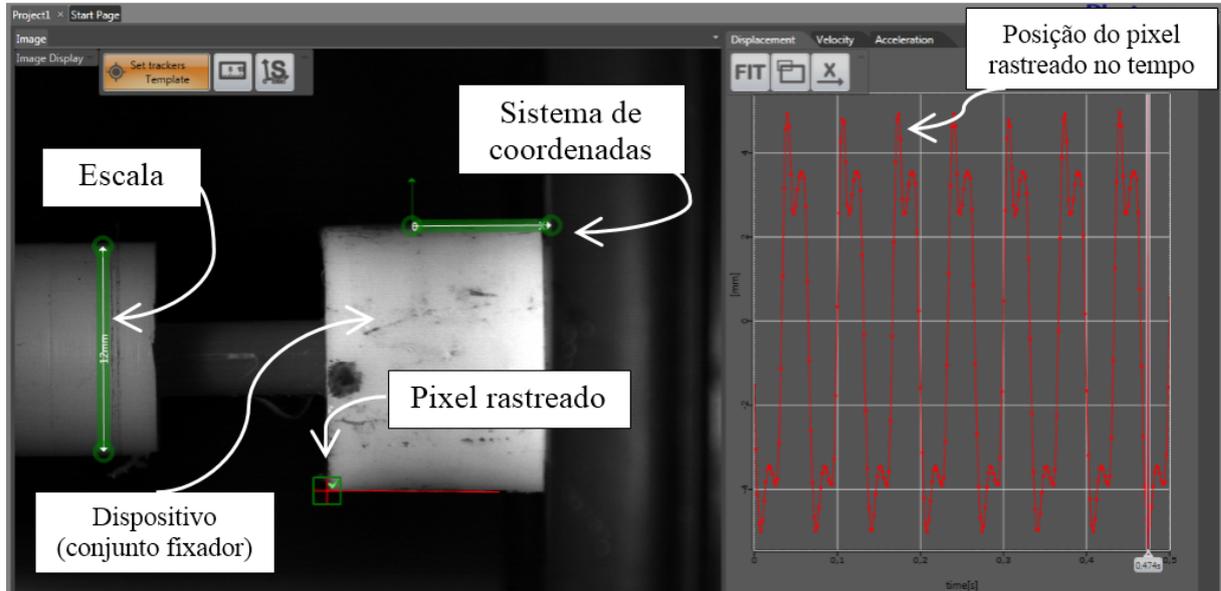
Fonte: Elaborado pelo autor.

O processo de calibração foi iterativo, ou seja, foram determinados valores de tensão de avanço e recuo via software – sendo esse software carregado no microcontrolador, para cada amplitude de oscilação, e medidos os respectivos deslocamentos - avanço e recuo, através das filmagens realizadas com a câmera de alta velocidade. Definiu-se como frequência de calibração a mediana do intervalo de frequências reguláveis, ou seja, 15 Hz. A soma dos deslocamentos em avanço e recuo deveria retornar um valor igual a amplitude desejada. Portanto, o processo de calibração se repetia até alcançar tal objetivo.

As medições de deslocamento foram realizadas utilizando o software Photron Fastcam Analysis (PFA), um software próprio do fabricante da câmera. Nesse software, é definido um pixel para que seja rastreado o seu deslocamento, uma escala e um eixo de referência (sistema de coordenadas). A taxa de amostragem utilizada foi de 1000 frames por segundo, adotando-se uma velocidade do obturador (*shutter*) de 1/1000s. A variação do deslocamento do pixel selecionado é mostrada durante a execução do software em um gráfico lateral, sendo possível também exportar os resultados para um formato de arquivo compatível com o software Microsoft Excel. Para o correto posicionamento do sistema de coordenadas, uma imagem inicial do dispositivo na posição de repouso foi utilizada. Embora não traga prejuízo algum as análises e resultados do atual estudo, ressalta-se que devido ao sistema de coordenadas adotado durante os procedimentos de calibração (fato esse que se repetirá nos procedimentos de caracterização) o movimento de avanço do conjunto fixador (no sentido de se aproximar da guia de condução)

é representado por valores negativos de deslocamento nos gráficos posteriormente apresentados, sendo o movimento de recuo representado pelos valores positivos. A Figura 37 apresenta a interface do software durante a execução de uma das medições da calibração.

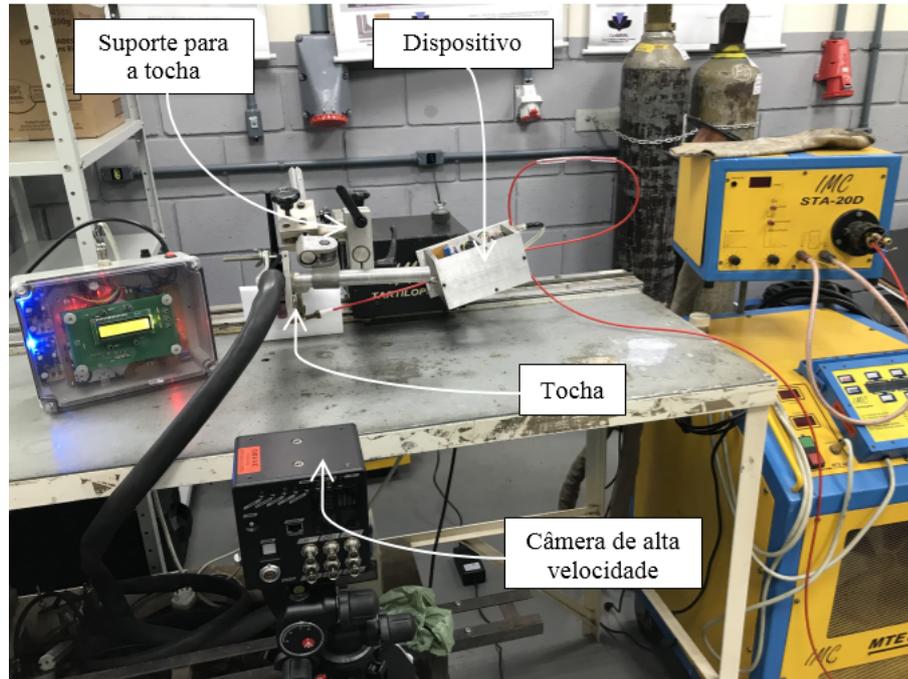
Figura 37 – Interface do software PFA utilizada nos ensaios de calibração.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Após a calibração inicial - dispositivo sem arame na posição horizontal, cujo objetivo foi o entendimento preliminar do seu comportamento, posicionou-se o dispositivo na condição na qual posteriormente seriam realizados os ensaios de soldagem, e foi introduzido o arame de adição (com diâmetro de 1 mm) em sua estrutura. Dessa forma, uma nova calibração pôde ser realizada. Essa nova calibração contemplou os efeitos de inércia adicional imposta pelo arame e pelo posicionamento do conduíte, exigindo, portanto, patamares de tensão mais distantes da tensão média (2,5 V) para que fosse possível alcançar os deslocamentos desejados. O posicionamento do dispositivo com arame pode ser observado na Figura 38.

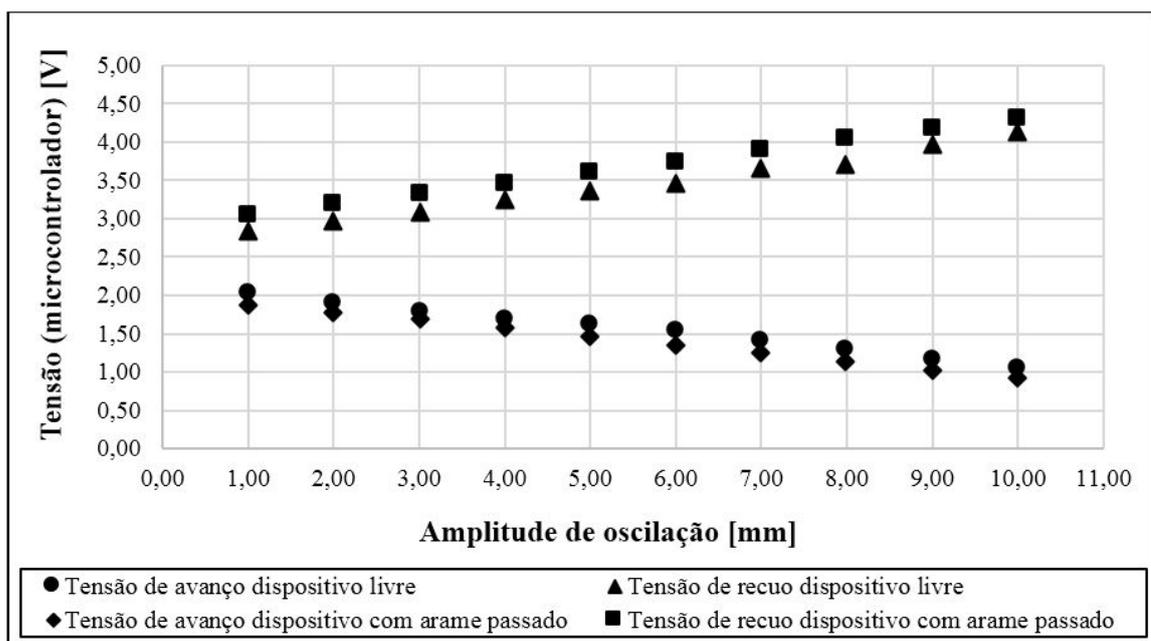
Figura 38 – Bancada utilizada para a calibração final do dispositivo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Em ambas as calibrações - inicial e final, percebeu-se uma relação linear entre a tensão imposta pelo microcontrolador e a amplitude de oscilação medida, tanto para a tensão de avanço, quanto para a tensão de recuo, como pode ser observado na Figura 39.

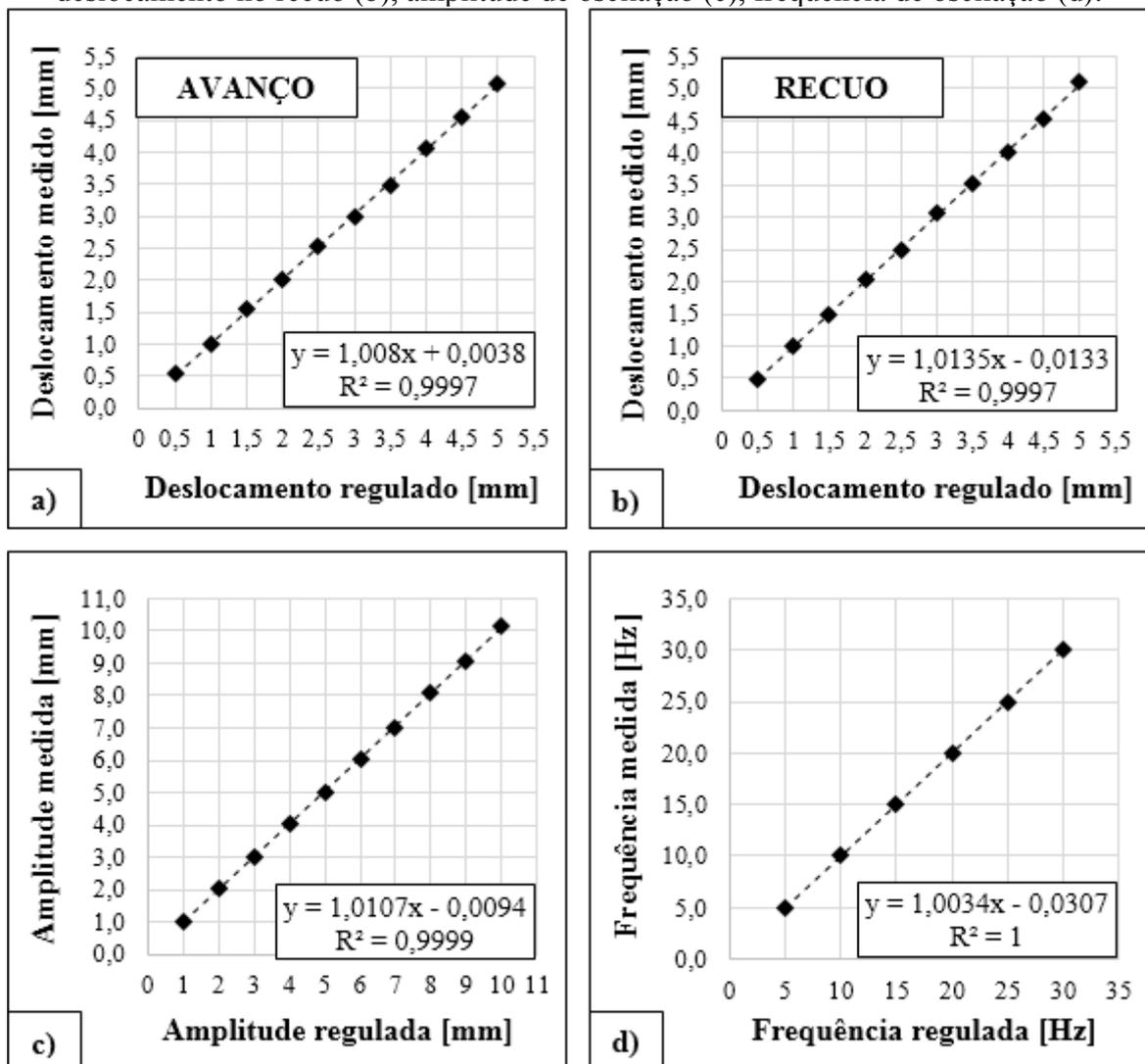
Figura 39 – Relação entre a tensão fornecida pelo microcontrolador e a amplitude de oscilação.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Por fim, para ambas as variáveis de oscilação – amplitude e frequência, foi avaliada a correspondência entre os valores regulados e aqueles medidos. Selecionou-se um intervalo correspondente a 5 períodos do sinal retangular. Para cada amplitude de oscilação regulada, em uma frequência de oscilação constante de 15 Hz, calculou-se a média aritmética simples entre os 5 valores de deslocamentos máximos medidos no recuo e no avanço. Já para a frequência de oscilação, a avaliação foi feita em intervalos de 5 Hz, de 5 a 30 Hz, em amplitude de oscilação constante correspondente a mediana dos valores reguláveis, ou seja, 5 mm. Assim como para a amplitude, calculou-se a média aritmética simples entre 5 medições de período. Tanto para a amplitude quanto para a frequência de oscilação, os valores regulados foram muito próximos dos medidos, como mostra a Figura 40.

Figura 40 – Relação entre variáveis medidas e reguladas: deslocamento no avanço (a), deslocamento no recuo (b), amplitude de oscilação (c), frequência de oscilação (d).



Fonte: Elaborado pelo autor.

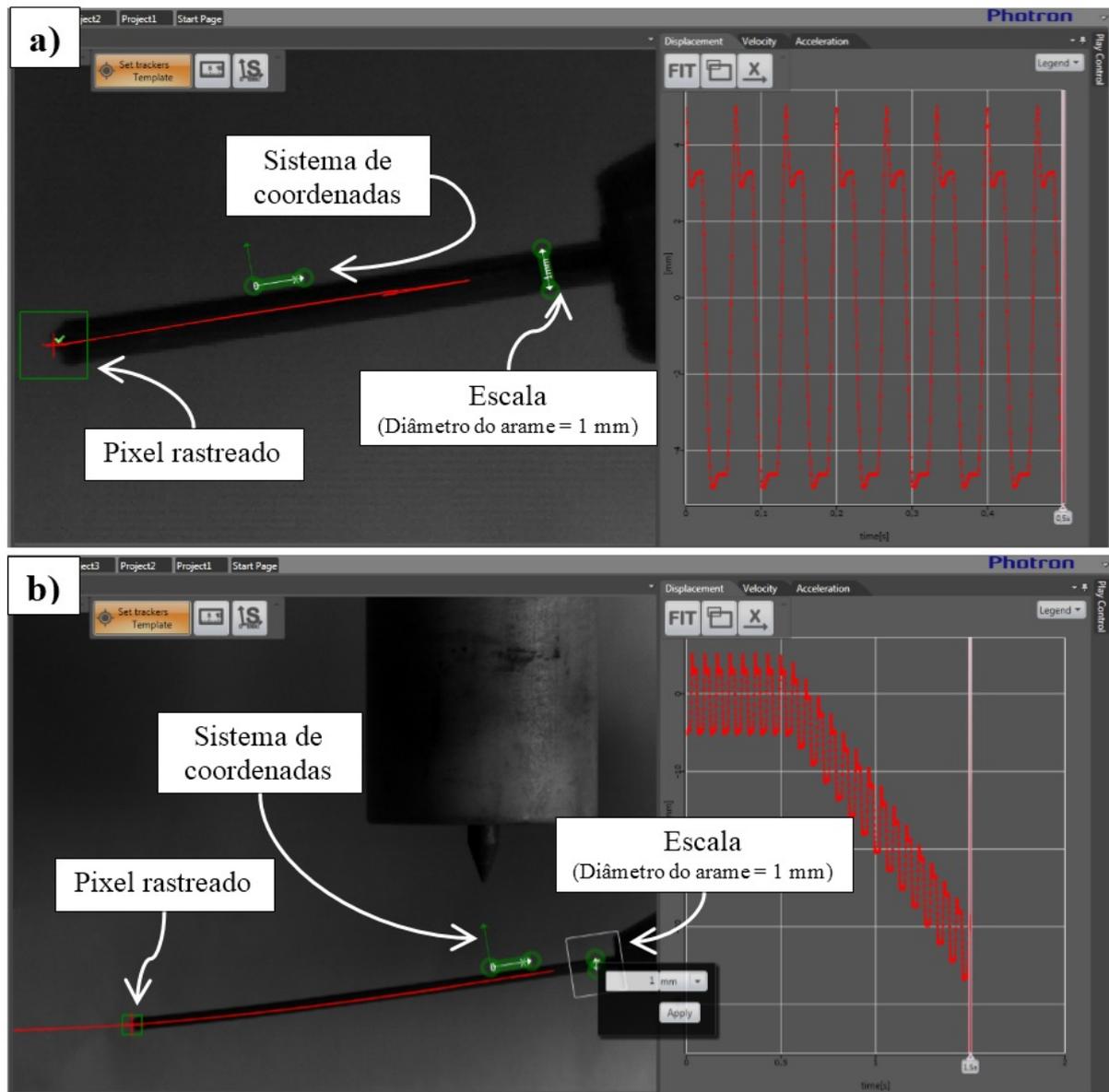
4.2 CARACTERIZAÇÃO DO DISPOSITIVO

Assim como a calibração do dispositivo, sua caracterização foi viabilizada pela utilização da câmera de alta velocidade Photron Fastcam Mini, modelo UX50-160K, utilizada para realização das filmagens e posterior análise. A caracterização foi dividida em 2 etapas. Na primeira, foi analisado o movimento do conjunto móvel do transdutor eletromecânico - ou seja, o movimento do conduíte dentro da guia de condução, que é transferido ao arame por atrito. Tal análise aconteceu na condição de dispositivo livre, e, portanto, sem arame presente em sua estrutura. As curvas de deslocamento em função do tempo na frequência de oscilação de 15 Hz são discutidas, bem como as curvas de velocidade e aceleração durante os movimentos de avanço e recuo. Além disso, para uma amplitude de oscilação fixa de 5 mm, são apresentadas e discutidas as curvas de deslocamento em função do tempo para determinadas frequências de oscilação.

Na segunda etapa da caracterização, compara-se as curvas de deslocamento do dispositivo livre com as curvas de deslocamento do dispositivo na sua condição de operação – arame passado na estrutura e posicionado para operar (Figura 38). Nesse ponto, o dispositivo apresentava a calibração final. São apresentadas também as curvas que representam o deslocamento da ponta do arame tanto para a condição de velocidade de alimentação nula, quanto para a condição de velocidade de alimentação regulada igual a 2 m/min - em frequência fixa de 15 Hz.

Com relação a segunda etapa da caracterização do dispositivo, a Figura 41 mostra a operacionalização do software PFA para que fossem extraídos os dados de deslocamento da ponta do arame, viabilizando a posterior análise.

Figura 41 - Interface do software PFA durante ensaios de caracterização do deslocamento da ponta do arame. Em (a) velocidade de alimentação nula, (b) velocidade de alimentação igual a 2 m/min.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3 ENSAIOS DE SOLDAGEM

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Tecnologia da Soldagem da Universidade Federal de Santa Catarina, localizado no campus de Joinville. Foi concebida uma bancada de ensaios (Figura 42) composta por uma fonte de soldagem multiprocesso (modelo MTE DigiTEC 450), um sistema de deslocamento linear para a tocha de soldagem com um grau de liberdade (modelo Tartílope V1), um cabeçote tracionador de arame (modelo STA-20D) e o dispositivo para oscilação longitudinal do arame concebido no âmbito do presente trabalho.

Além disso, para que fosse possível o monitoramento das variáveis do processo de soldagem como a tensão de arco e corrente de soldagem, foi utilizado um Sistema de Aquisição de dados Portátil (SAP V4).

Figura 42 – Bancada de ensaios empregada nos ensaios de soldagem.



Fonte: Elaborado pelo autor.

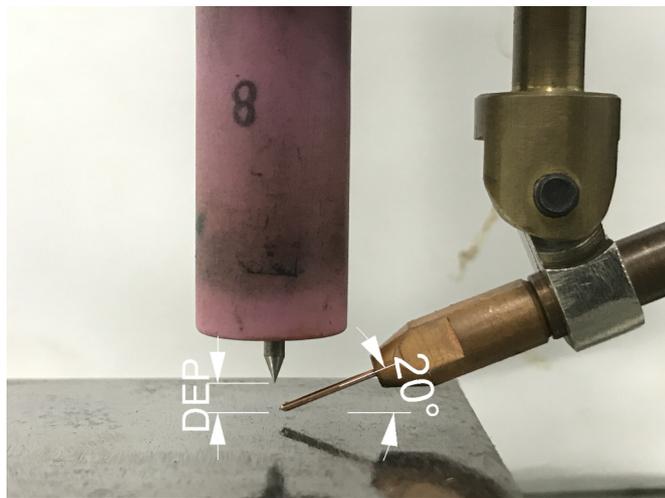
Os ensaios foram conduzidos utilizando-se a técnica de simples deposição sobre chapa, em corpos de prova de aço baixo carbono SAE 1012 (certificado da chapa apresentado no Anexo A) com dimensões de 180x90x4,75 mm. Um único cordão de aproximadamente 140 mm de comprimento foi realizado no centro da largura de cada corpo de prova. A Tabela 2 apresenta os parâmetros que foram mantidos constantes em todos os ensaios de soldagem, e a Figura 43 mostra o posicionamento da tocha de soldagem e do bico direcionador do arame de alimentação.

Tabela 2 – Parâmetros do processo de soldagem comuns a todos os ensaios.

Corrente de soldagem [A] {média, medida}	150 {152,24 ± 0,07}
Tensão média do arco medida [V]	12,52 ± 0,28
Velocidade de soldagem [cm/min]	15
DEP [mm]	4
Especificação do arame de adição	AWS ER 70S-6
Diâmetro do arame de adição [mm]	1,0
Ângulo de alimentação do arame [graus]	20
Especificação do eletrodo	AWS EW Th-2
Diâmetro do eletrodo [mm]	2,4
Ângulo de afiação do eletrodo [graus]	30
Gás de proteção	Argônio
Vazão do gás de proteção [L/min]	12

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 43 – Posicionamento da tocha e bico direcionador do arame de adição.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A velocidade de alimentação do arame foi definida a partir de ensaios preliminares de maneira a se obter a condição operacional desejada, no que se refere ao modo de transferência metálica e ao posicionamento do arame de adição em relação a poça de fusão. Desta forma, são estudadas três condições operacionais. Na primeira, utilizando uma velocidade de alimentação do arame de 1,5 m/min, a transferência metálica acontece no modo Ponte Contínua (PC). Na segunda condição, com a velocidade de alimentação de 2,2 m/min, tem-se o modo de operação com o Arame Enterrado (AE) na poça de fusão continuamente. Por fim, a terceira condição operacional é caracterizada pela Transferência metálica Intermitente (TI), ou em gotas, obtida

com a velocidade de alimentação do arame de 0,5 m/min. Ressalta-se que a investigação das condições operacionais supracitadas foi realizada a partir da alimentação do arame de forma contínua, ou seja, sem sua oscilação.

Nos ensaios de soldagem propostos no atual estudo, empregou-se apenas o modo padrão de operação do dispositivo concebido. Ainda, além da condição operacional, a frequência e a amplitude de oscilação também foram variados com o intuito de investigar os efeitos destas variáveis associada à oscilação longitudinal do arame sobre os aspectos morfológicos e metalúrgicos dos cordões de solda. Foram realizados dez ensaios de soldagem para cada condição operacional descrita anteriormente. Destes, o primeiro é o ensaio de referência, no qual o arame é alimentado sem qualquer oscilação. Os outros nove ensaios são o resultado da combinação de 3 amplitudes e 3 frequências distintas. As amplitudes empregadas foram 2, 5 e 8 mm, e as frequências 2, 10 e 18 Hz. A Tabela 3 apresenta a matriz de realização dos ensaios realizados e suas nomenclaturas.

Tabela 3 – Nomenclatura dos ensaios realizados e variação de parâmetros da oscilação longitudinal e condições operacionais.

Frequência de oscilação do arame [Hz]	Amplitude de oscilação do arame [mm]	Condição operacional	Nomenclatura do ensaio	Condição operacional	Nomenclatura do ensaio	Condição operacional	Nomenclatura do ensaio
0	0	TI	TI00	PC	PC00	AE	AE00
2	2	TI	TI22	PC	PC22	AE	AE22
2	5	TI	TI25	PC	PC25	AE	AE25
2	8	TI	TI28	PC	PC28	AE	AE28
10	2	TI	TI102	PC	PC102	AE	AE102
10	5	TI	TI105	PC	PC105	AE	AE105
10	8	TI	TI108	PC	PC108	AE	AE108
18	2	TI	TI182	PC	PC182	AE	AE182
18	5	TI	TI185	PC	PC185	AE	AE185
18	8	TI	TI188	PC	PC188	AE	AE188

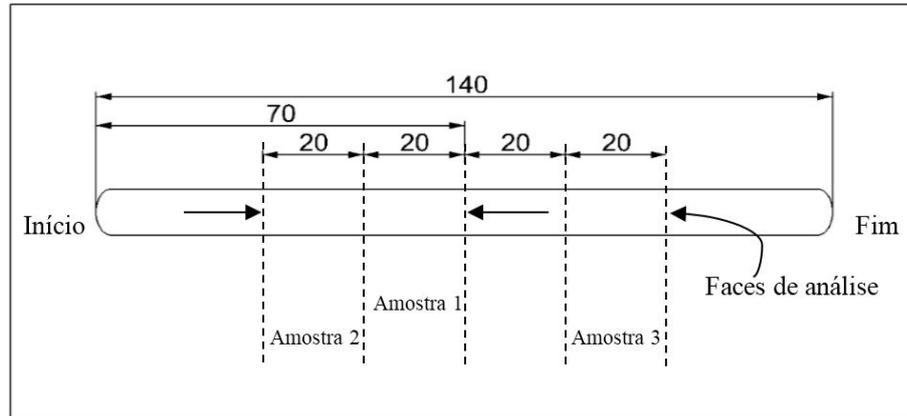
Fonte: Elaborado pelo autor.

4.4 CARACTERIZAÇÃO DOS CORDÕES DE SOLDA

A primeira atividade associada à caracterização dos cordões de solda foi o registro fotográfico da face de todos os cordões realizados no estudo, o que viabilizou a discussão acerca da regularidade da face e dos demais aspectos superficiais dos cordões. A segunda etapa de caracterização dos cordões de solda foi precedida por cortes refrigerados de seções transversais dos cordões. Esses permitiram, através da técnica de macroscopia, avaliar as características

geométricas da zona fundida. Foram extraídas 3 amostras por cordão de solda, o que permitiu a determinação das características geométricas da zona fundida a partir da média aritmética simples das medições realizadas para cada amostra. O posicionamento dos cortes é apresentado na Figura 44.

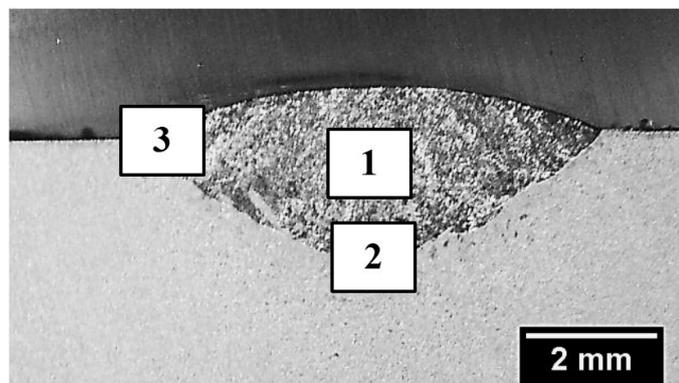
Figura 44 – Posição dos cortes transversais para retiradas de amostras (dimensões em milímetros).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Por fim, selecionou-se a amostra central (amostra 1) de cada conjunto de 3 amostras submetidas a macroscopia (por cordão de solda) para realização de micrografias das seções transversais. Foram obtidas imagens em 3 regiões distintas da seção transversal dos cordões: centro da zona fundida (região 1), região da linha de fusão na raiz (região 2) e na margem esquerda (região 3), conforme mostrado na Figura 45.

Figura 45 – Regiões de obtenção das micrografias.



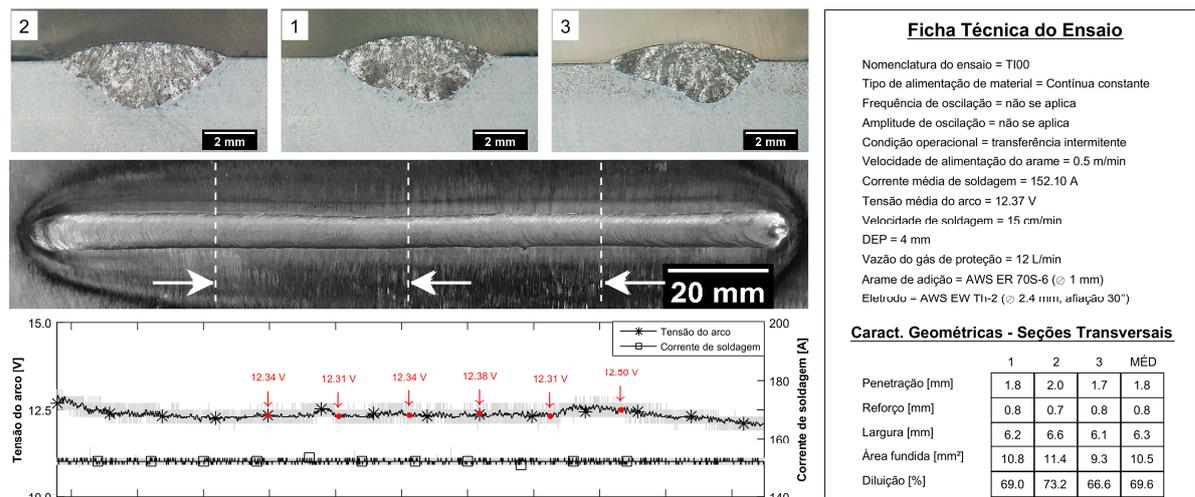
Fonte: Elaborado pelo autor.

A preparação metalográfica das amostras se iniciou com o embutimento em resina poliéster cristal. Após, a seção transversal das amostras foram submetidas ao lixamento com

lixas de gramaturas de 80 a 1000, para as macroscopia, e gramaturas de 1000 até 1500 para a microscopia, seguida de polimento (alumina em suspensão de $0,3 \mu\text{m}$). O ataque químico foi realizado através da técnica de imersão, utilizando os reagentes Nital 4% e Marble. As imagens foram obtidas no Laboratório de Tecnologia da Soldagem através de um estereoscópio da modelo DI-152T e um microscópio modelo B100I, sendo que as características geométricas da zona de fusão de cada amostra foram mensuradas com o auxílio do software de domínio público *ImageJ*.

Para uma melhor visualização integrada das macrografias, face dos cordões e aquisições da tensão do arco e da corrente de soldagem, foi desenvolvido um código com o auxílio do software *Matlab*. Esse código gera uma janela gráfica para cada ensaio realizado, agrupando tais resultados. Informando ao código os diretórios onde estão armazenadas as figuras de interesse, bem como onde se armazenam os arquivos de texto que contém as aquisições de tensão do arco, corrente de soldagem, características geométricas de cada amostra e os parâmetros do processo de soldagem comuns a todos os ensaios (Tabela 2), é gerado a figura que foi chamada de Ficha Técnica do Ensaio (Figura 46). No Apêndice B apresenta-se a ficha técnica do ensaio TI00 em maior dimensão, permitindo a melhor visualização. O desenvolvimento do código teve por objetivo facilitar a análise conjunta de parte dos resultados obtidos nesse estudo, além de armazenar de maneira sistemática e organizada tais resultados.

Figura 46 – Ficha Técnica do Ensaio TI00.



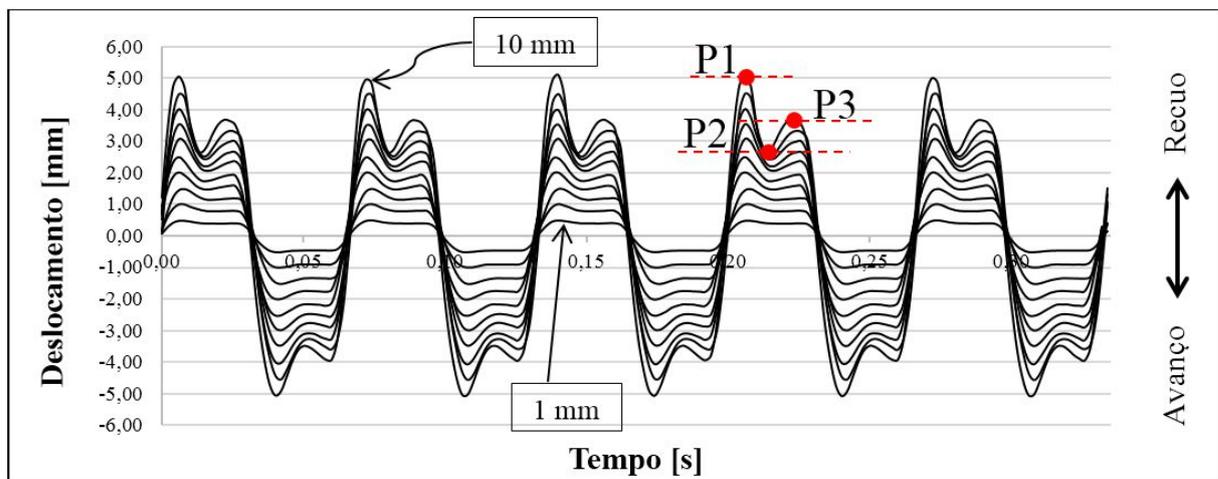
Fonte: Elaborado pelo autor.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 CARACTERIZAÇÃO DO DISPOSITIVO

Na Figura 47 são apresentadas as curvas de deslocamento do dispositivo (conjunto fixador), sem a presença de arame.

Figura 47 – Curvas de deslocamento obtidas para a condição de dispositivo livre nas amplitudes de oscilação de 1 a 10 mm, em intervalos de 1 mm, e frequência de oscilação de 15 Hz.



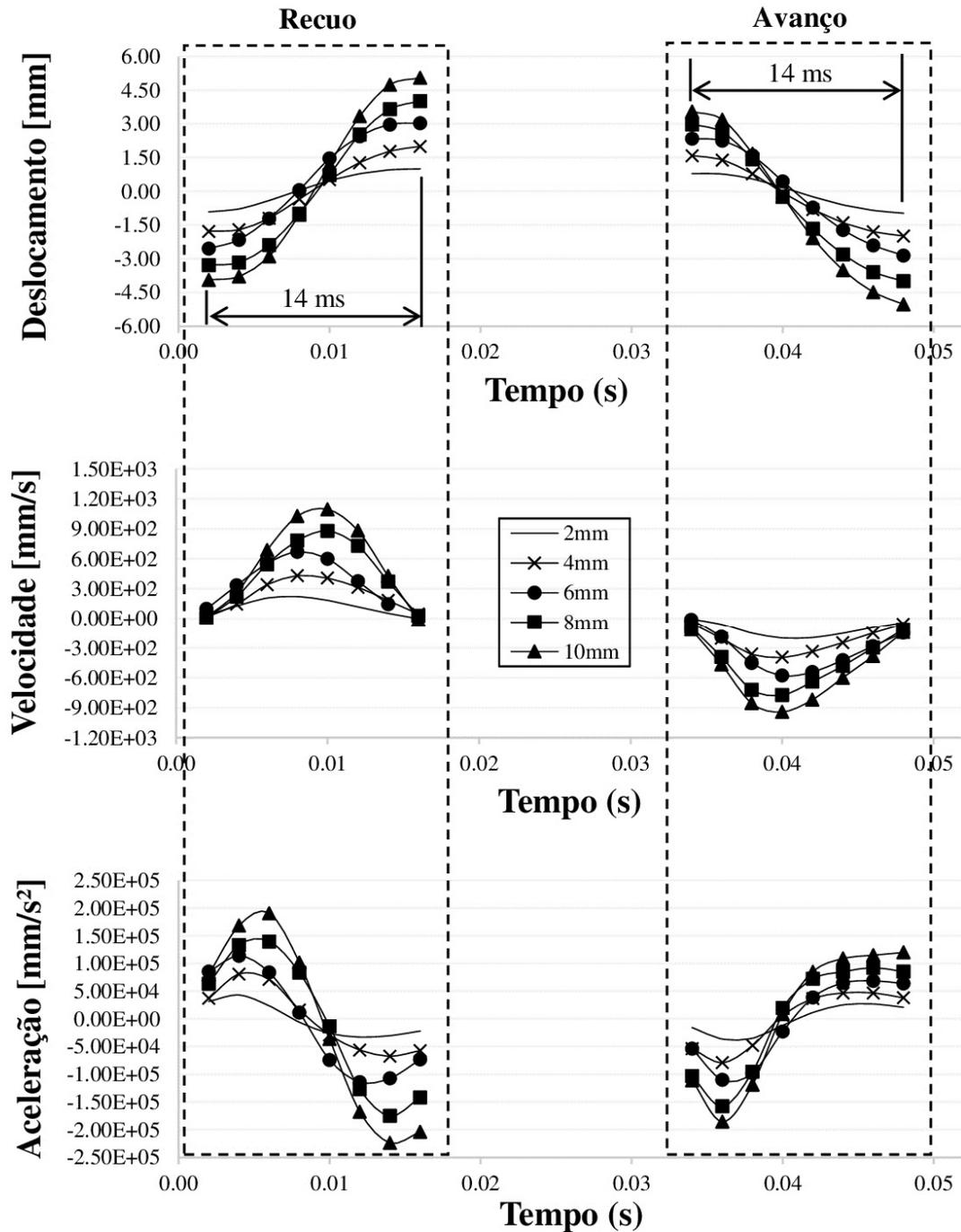
Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme pode ser visto tanto no movimento de avanço quanto de recuo, o dispositivo foi capaz de promover a oscilação com magnitude de acordo com o regulado. As curvas permitem, ainda, a verificação de um fenômeno de formação de picos de deslocamento que são percebidos tanto no movimento de avanço, quanto no recuo, nas respectivas regiões de máximo deslocamento. Foi constatado que tal fenômeno ocorre em função da elevada demanda de corrente por parte do dispositivo nos intervalos de tempo nos quais o mesmo assume a sua posição fixa de avanço ou recuo. Aproximando o modelo elétrico da bobina do transdutor eletromecânico a um indutor, sabe-se que quando percorrido por corrente constante, este se comporta como um curto-circuito. Assim, quando está na posição de avanço ou recuo, o dispositivo exige um elevado valor de corrente elétrica, que cresce para maiores amplitudes de oscilação. Logo, para evitar este comportamento típico, o circuito de controle teria que fornecer valores de corrente elétrica muito elevados, o que poderia vir a danificar a bobina do dispositivo eletromecânico por efeito Joule, que não é projetada para operar nesta condição.

A partir da amplitude de oscilação de 4 mm existe uma clara distinção entre 3 patamares de deslocamentos alcançados durante o tempo de permanência no avanço ou recuo (ou tempo de estagnação). Esses patamares são representados na Figura 47 sobre a curva de deslocamento respectiva a amplitude de oscilação de 10 mm (onde, “P1” corresponde ao patamar 1, “P2” ao patamar 2 e “P3” ao patamar 3. Quando o deslocamento máximo é atingido, em P1 (seja no avanço ou recuo), o dispositivo permanece nessa posição por um relativo curto período de tempo, se deslocando para P2. Do segundo patamar, atinge P3 e se estabelece lá até que o seu período de permanência na posição configurada seja finalizado, sendo P3 uma condição de equilíbrio.

Na Figura 48 são apresentadas as curvas de deslocamento, velocidade e aceleração que descrevem o movimento do dispositivo durante o movimento de avanço e o recuo.

Figura 48 – Curvas de deslocamento, velocidade e aceleração (dispositivo livre) que representam os movimentos de avanço e recuo do conjunto fixador nas amplitudes de oscilação de 2 a 10 mm, em intervalos de 2 mm, e frequência de oscilação de 15 Hz.



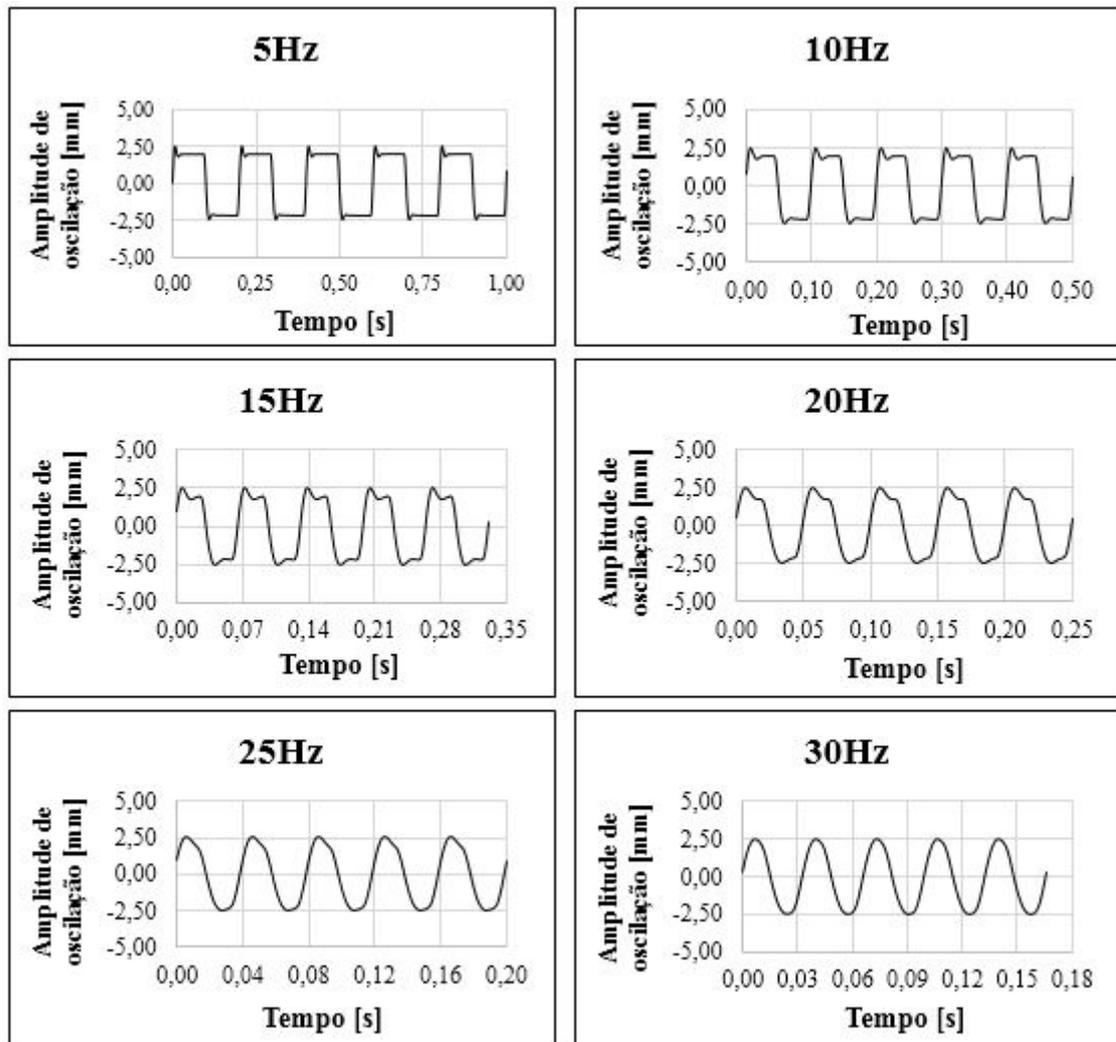
Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir das curvas de deslocamento apresentadas na Figura 48, verifica-se que tanto durante o movimento de avanço, quanto no recuo, o dispositivo não apresenta uma velocidade de movimentação constante em função do tempo, já que a inclinação da reta que tangencia cada ponto de deslocamento se altera durante o movimento. Tal verificação está de acordo com as

curvas de velocidade apresentadas na Figura 48. A maior inclinação observada nas curvas de deslocamento, para todas as amplitudes de oscilação está associada a passagem pela posição de deslocamento igual a 0 mm, ou seja, o ponto de equilíbrio. de maneira que os picos de velocidade são observados exatamente nessa posição. Como a frequência de oscilação é fixa, para maiores amplitudes de oscilação o dispositivo precisa se movimentar com maior velocidade – já que precisa executar um maior deslocamento num mesmo período de tempo. Por esse motivo percebe-se um crescimento do pico de velocidade na medida em que se aumenta a amplitude de oscilação. As curvas de aceleração possuem maiores valores em módulo próximo as regiões de início e final do movimento de avanço e recuo. Esse comportamento é justificado em função da necessidade que o dispositivo tem nessas regiões de inicialmente sair de um posição de estagnação (período em que fica na posição definida pela amplitude de oscilação) e posteriormente “frear” (causando uma intensa desaceleração) seu movimento para estabelecer novamente outra posição de estagnação. Dessa forma é natural que a aceleração seja nula na posição de equilíbrio, já que nessa posição o dispositivo está invertendo a sua atuação de aceleração para desaceleração, ou vice-versa.

Ressalta-se também que qualitativamente, o comportamento do dispositivo no que se refere ao avanço e ao recuo são muito semelhantes, de maneira que certas limitações associadas a primeira versão do dispositivo desenvolvida no LTS tendem a ser mitigadas. Na Figura 49 apresentam-se as curvas de deslocamento do dispositivo para a amplitude fixa de 5 mm em função da frequência de oscilação, sendo que as escalas de tempo são ajustadas para a representação do mesmo número de oscilações entre avanço e recuo.

Figura 49 – Curvas de deslocamento do conjunto fixador para a condição de dispositivo livre nas frequências de oscilação de 5 a 30 Hz em intervalos de 5 Hz e amplitude de oscilação de 5 mm.

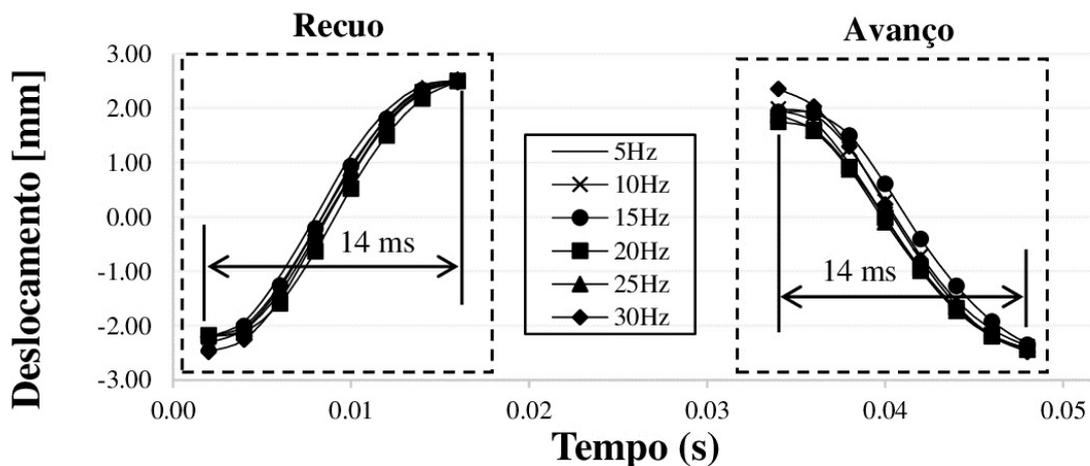


Fonte: Elaborado pelo autor.

Novamente, verifica-se que o dispositivo foi capaz de promover o deslocamento do dispositivo fixador com magnitude condizente com aquela regulada na IHM para todas as frequências de oscilação. Com relação ao fenômeno de formação de picos de deslocamento, percebe-se que o efeito é mitigado para maiores frequências de oscilação. Isso acontece, pois para maiores frequências o tempo de permanência na posição de avanço (ou recuo) é menor. Dessa forma, para elevadas frequências de oscilação(a partir de 25 Hz), a corrente necessária para manter o transdutor na posição desejada pelo pequeno período de tempo, se mostra suficiente com aquela que é fornecida pelo circuito de potência. Além disso, verifica-se que na medida em que se aumenta a frequência, o sinal retangular fornecido ao transdutor eletromecânico dá origem a um padrão de deslocamento que se aproxima de uma forma senoidal, o que diminui ainda mais o tempo de permanência nos patamares de avanço e recuo.

Foi constatado, ao sobrepor as curvas de deslocamento apresentadas na Figura 49 (com escala de tempo comum a todas), que o dispositivo necessita do mesmo período de tempo (14 ms) para se deslocar entre as posições de estagnação (para a amplitude fixa de 5 mm), independentemente da frequência de oscilação empregada, como mostra a Figura 50.

Figura 50 – Curvas de deslocamento (dispositivo livre) do conjunto fixador no avanço e recuo nas frequências de oscilação de 5 a 30 Hz, em intervalos de 5 Hz e amplitude de oscilação de 5 mm (escala de tempo fixa).

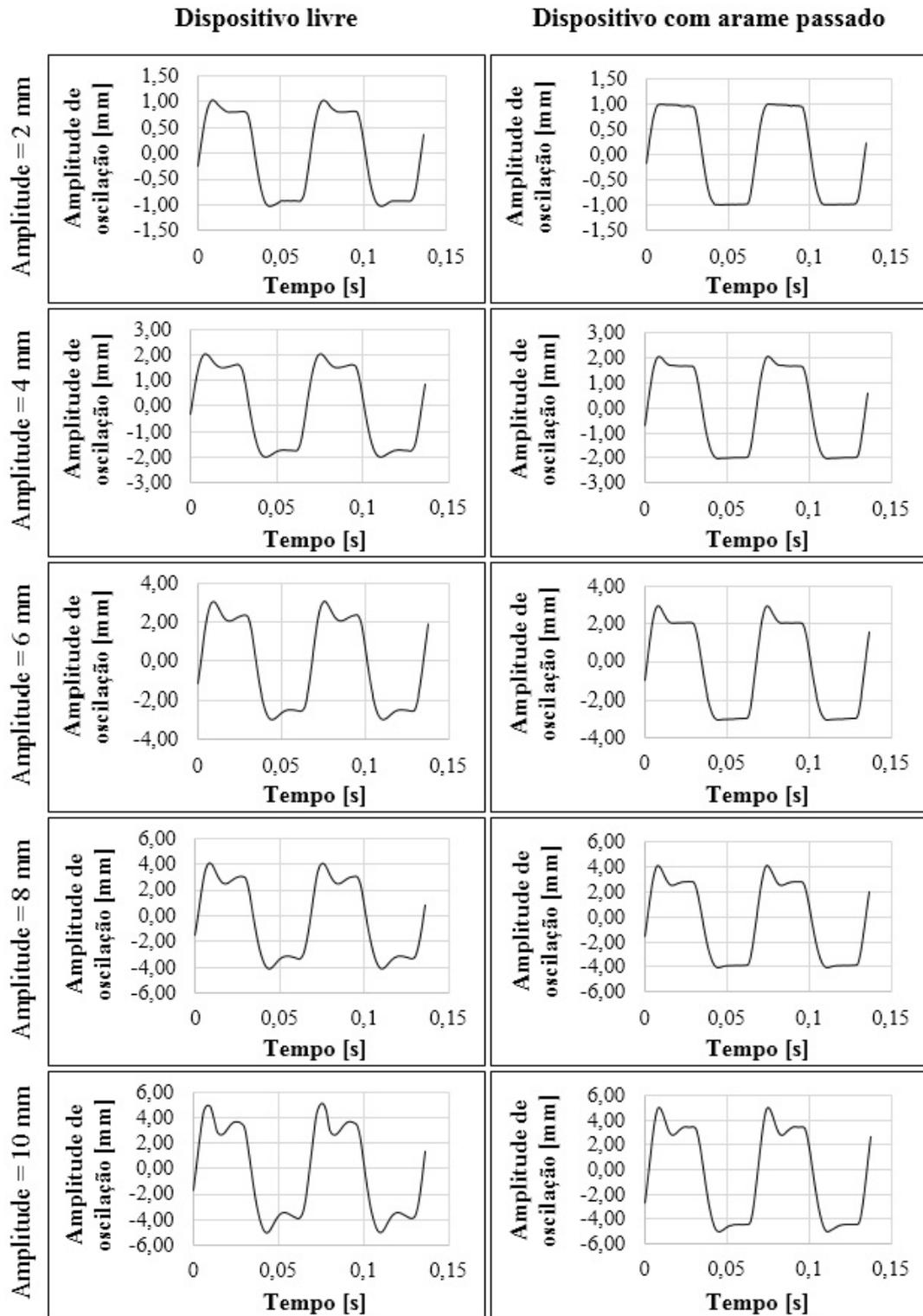


Fonte: Elaborado pelo autor.

Esse fato é responsável pela alteração do padrão de deslocamento do conjunto fixador, que passa de uma forma retangular para senoidal com o aumento da frequência. No caso do emprego de maiores frequências de oscilação, espera-se que a forma de onda que representa o deslocamento passe a ser triangular (em uma frequência aproximada de 36 Hz, considerando os 14 ms como meio período de onda). A partir dessa frequência, o dispositivo não seria mais capaz de fornecer a amplitude de oscilação de 5 mm. Ainda, como mostra a Figura 48, o tempo de transição entre posições de avanço e recuo para uma mesma frequência em função da amplitude de oscilação também é constante e igual a 14 ms. Dessa forma, a primeira etapa da caracterização do dispositivo é encerrada com a definição da frequência de 36 Hz como a frequência crítica – e não apenas para a amplitude de oscilação de 5 mm, mas para todo o intervalo regulável de amplitudes. Como a frequência crítica encontra-se fora do intervalo regulável de frequências de oscilação, o dispositivo sempre será capaz de fornecer a amplitude de deslocamento configurada, apesar de variar consideravelmente o formato da onda que representa o seu deslocamento para tal.

Na Figura 51 são comparados os movimentos de oscilação do dispositivo na condição livre e com arame em seu interior. Para todas as amplitudes de oscilação (frequência fixa de 15 Hz) verifica-se que para ambas as condições, a amplitude configurada na IHM foi entregue em forma de deslocamento. Comparando as curvas de deslocamento respectivas a amplitude de oscilação de 2 mm, na condição de arame passado não percebe-se distinção entre patamares máximos de deslocamento nas regiões de estagnação, seja no avanço ou no recuo, enquanto para a condição de dispositivo livre existe clara diferenciação entre P1 e P2 (sendo P3 muito próximo de P2). Isso acontece pois, quando o dispositivo se movimenta com o arame em seu interior, por meio do atrito com o conduíte esse arame se desloca no mesmo sentido, se apresentando como uma inércia adicional. Portanto, o dispositivo com arame é capaz de fornecer a mesma amplitude de oscilação do dispositivo livre. Na medida em que a amplitude de oscilação é incrementada, já para 4 mm, nota-se o deslocamento de P1 para P2 no caso do dispositivo livre. No entanto, mais uma vez em função da inércia adicional causada pela presença do arame, não percebe-se mudança de P2 para P3 quando o arame está passado na estrutura do dispositivo. Isso se repete para a amplitude de oscilação de 6 mm, sendo que a partir de 8 mm de amplitude verifica-se novamente os 3 patamares para ambas as condições de operação do dispositivo (livre e com arame passado).

Figura 51 – Comparação entre as curvas de deslocamento para a condição de dispositivo livre e com arame em seu interior (frequência de oscilação de 15 Hz e amplitudes de oscilação de 2 a 10 mm, em intervalos de 2 mm).

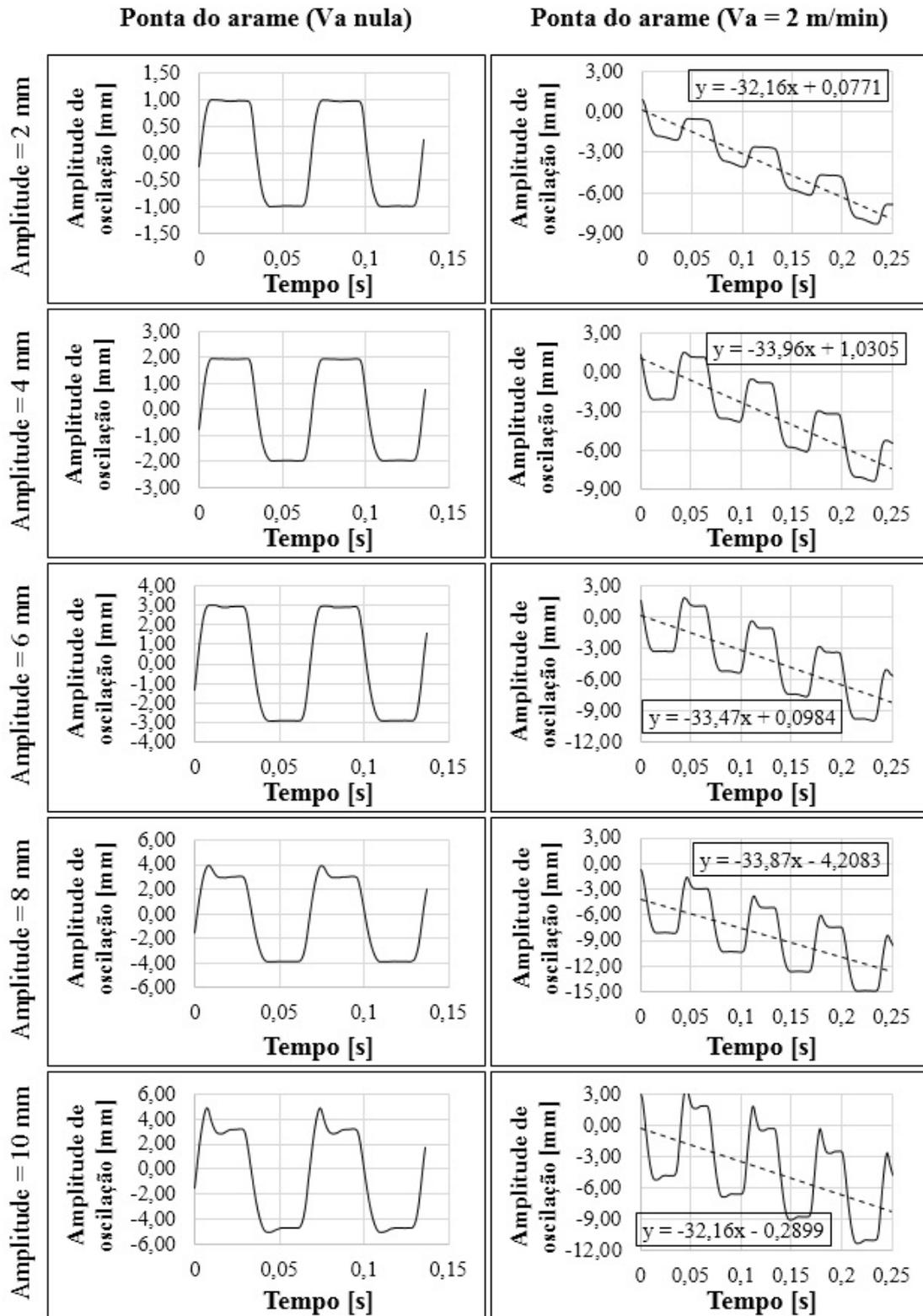


Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 52 são apresentadas as curvas de deslocamento da ponta do arame, tanto para a condição de velocidade de alimentação nula quanto para a condição de V_A igual a 2 m/min. Verifica-se que a amplitude de oscilação regulada na IHM se reflete naquela da ponta do arame, para todas as amplitudes de oscilação analisadas. Nesse ponto, ressalta-se o benefício da concepção de um dispositivo que atua na oscilação em uma região mais próxima a ponta do arame, de maneira que não são percebidos efeitos elásticos na oscilação do arame (já que este não percorre grande extensão de conduíte), como ressaltado por Martins [34] em sua discussão a respeito do TIP TIG.

Quando são comparadas as curvas de deslocamento do dispositivo com arame passado (Figura 51) e as curvas de deslocamento da ponta do arame com velocidade de alimentação do arame nula (Figura 52), percebe-se semelhança para a condição de amplitude de oscilação de 2 mm, com sensíveis alterações para as demais condições de amplitude. Para as amplitudes de oscilação de 4 e 6 mm, não é mais perceptível na análise do deslocamento da ponta do arame a transição entre P1 e P2. Dessa forma, verifica-se um pequeno escorregamento entre arame e conduíte (ou entre arame e dispositivo) nessas condições. A força de atrito entre o arame e o conduíte não é suficiente para anular o movimento relativo entre as duas partes durante o leve recuo do dispositivo, resultando nas alterações percebidas. Ressalta-se que, apesar de existir o escorregamento descrito, esse efeito acaba sendo benéfico para a operação do dispositivo, já que, de maneira geral, as transições entre os patamares relatados não são desejáveis. Na amplitude de oscilação de 8 mm, nota-se uma menor diferença entre P1 e P2 para a ponta do arame, o que também está associado a um escorregamento, já que o arame recua junto com o dispositivo até que a força de atrito é vencida e ele permanece em estagnação. A menor diferença entre P1 e P2, causada pelo escorregamento na amplitude de oscilação de 8 mm, foi responsável também pela menor diferença observada entre P2 e P3 na comparação com o deslocamento do dispositivo com arame passado. O mesmo efeito observado para a amplitude de oscilação de 8 mm, foi observado para a condição de 10 mm, no entanto com uma magnitude de escorregamento sensivelmente menor.

Figura 52 – Curvas de deslocamento da ponta do arame para a condição de V_a nula e $V_a = 2$ m/min (frequência de oscilação de 15 Hz e amplitudes de oscilação de 2 a 10 mm, em intervalos de 2 mm).



Fonte: Elaborado pelo autor.

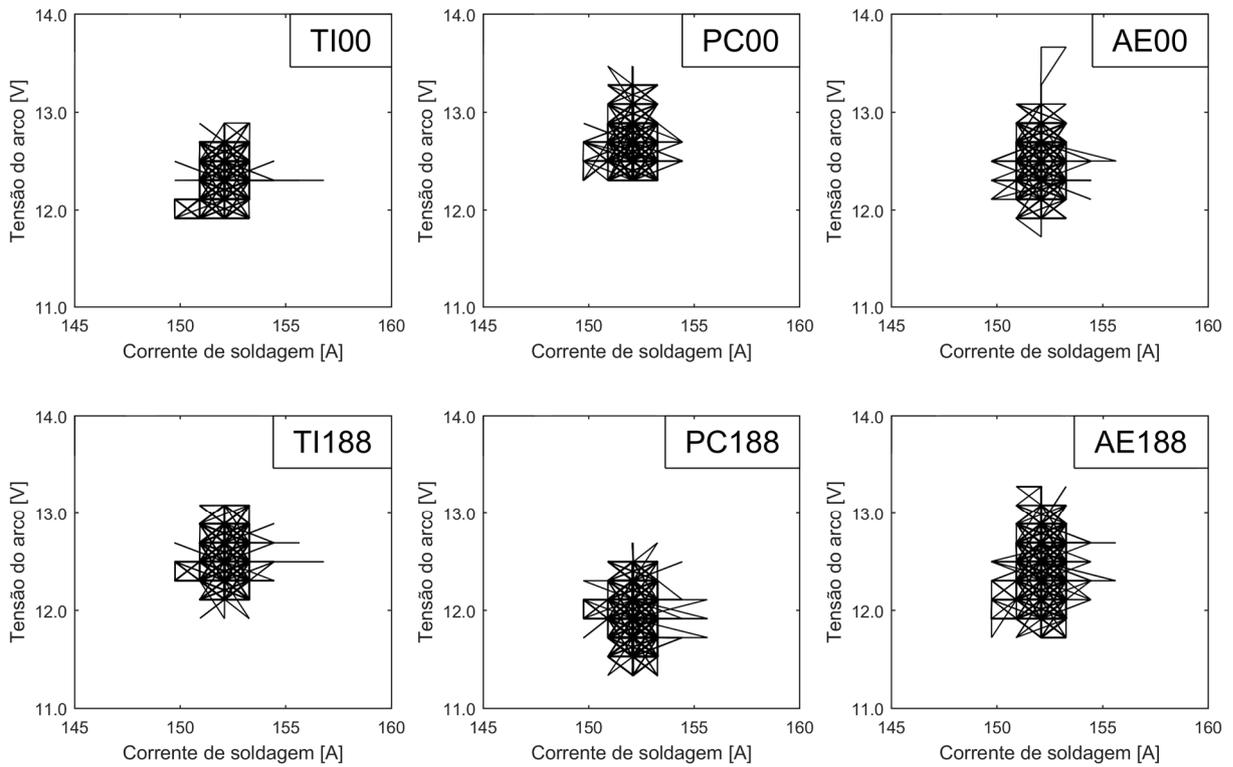
No que se refere ao deslocamento da ponta do arame com V_A regulada igual a 2 m/min (Figura 52) percebe-se que o fato de se impor uma velocidade de alimentação não afeta o desempenho do dispositivo, que mais uma vez entrega as amplitudes de oscilação reguladas na IHM, bem como a frequência de oscilação. Com linhas de tendência lineares, foi possível obter as funções médias de posição para cada amplitude de oscilação analisada, como pode ser observado na Figura 52. Aplicando-se a operação de derivação às funções, ou de maneira equivalente observando o coeficiente angular das linhas de tendência lineares, obtém-se a velocidade média de deslocamento do arame. A velocidade média de deslocamento para todas as amplitudes de oscilação variou no intervalo de 32,16 a 33,96 mm/s, que corresponde a 1,93 a 2,04 m/min, que está de acordo com a velocidade de alimentação regulada no tracionador de arame.

5.2 ENSAIOS DE SOLDAGEM

5.2.1 Efeito da oscilação longitudinal do arame na estabilidade do processo

Utilizando os dados das aquisições da tensão de arco e corrente de soldagem, foram construídos ciclogramas que relacionam esses dois parâmetros do processo. O ciclograma é composto por retas que ligam 2 pontos de operação consecutivos do processo. Tal representação dos parâmetros de soldagem contribui para a análise de suas variações, permitindo uma análise qualitativa, porém estatística das variações entre diferentes ciclogramas. Na Figura 53 são apresentados os ciclogramas obtidos a partir dos dados dos ensaios de referência (alimentação contínua do arame – TI00, PC00 e AE00), bem como aqueles obtidos a partir dos ensaios com oscilação longitudinal do arame nas condições de maiores frequência e amplitude de oscilação (TI188, PC188 e AE188). A comparação entre os ciclogramas tem por objetivo a discussão acerca da estabilidade dos processos de soldagem realizados. Dessa forma, justifica-se a comparação entre os ensaios de referência e aqueles obtidos com oscilação longitudinal em maiores frequência e amplitude de oscilação, já que nesses últimos (dentro de todos aqueles realizados com oscilação longitudinal) é que se espera ter imposto a maior perturbação ao arco voltaico e, por consequência, ao processo como um todo.

Figura 53 – Cliclogramas da tensão do arco e corrente de soldagem das amostras de referência (alimentação contínua, TI00, PC00 E AE00) e das respectivas amostras com maior amplitude e frequência de oscilação (TI188, PC188, AE188).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Por meio da análise da Figura 53, constata-se, naturalmente, que a variação da tensão do arco se apresenta em maiores magnitudes do que a variação da corrente de soldagem. Tal verificação está ligada a configuração do modo de operação da fonte de soldagem durante os ensaios, que se deu no modo corrente constante. Ainda, no que se refere as condições operacionais adotadas, percebe-se que tanto para os ensaios de referência, quanto para os ensaios realizados com oscilação longitudinal do arame, a condição operacional de arame enterrado (AE) é aquela que apresenta a maior variação de tensão do arco, seguida pela condição operacional de ponte contínua (PC).

No caso das condições operacionais de arame enterrado e ponte contínua, em comparação com a condição de transferência intermitente, uma maior quantidade de material é depositada na poça de fusão. Ademais, como é discutido adiante no presente estudo, nessas condições operacionais são obtidas menores penetrações e diluições, o que acaba resultando em cordões com reforços expressivos. Dessa forma, a interposição de grande quantidade de material entre arco voltaico e peça de trabalho contribue para as variações observadas na tensão do arco, já que atua diretamente na distância eletrodo peça. Além disso, quando o arame toca a

poça de fusão, ele adquire o mesmo potencial da peça de trabalho e, portanto, o arco pode se acoplar a ele, alterando neste instante a DEP.

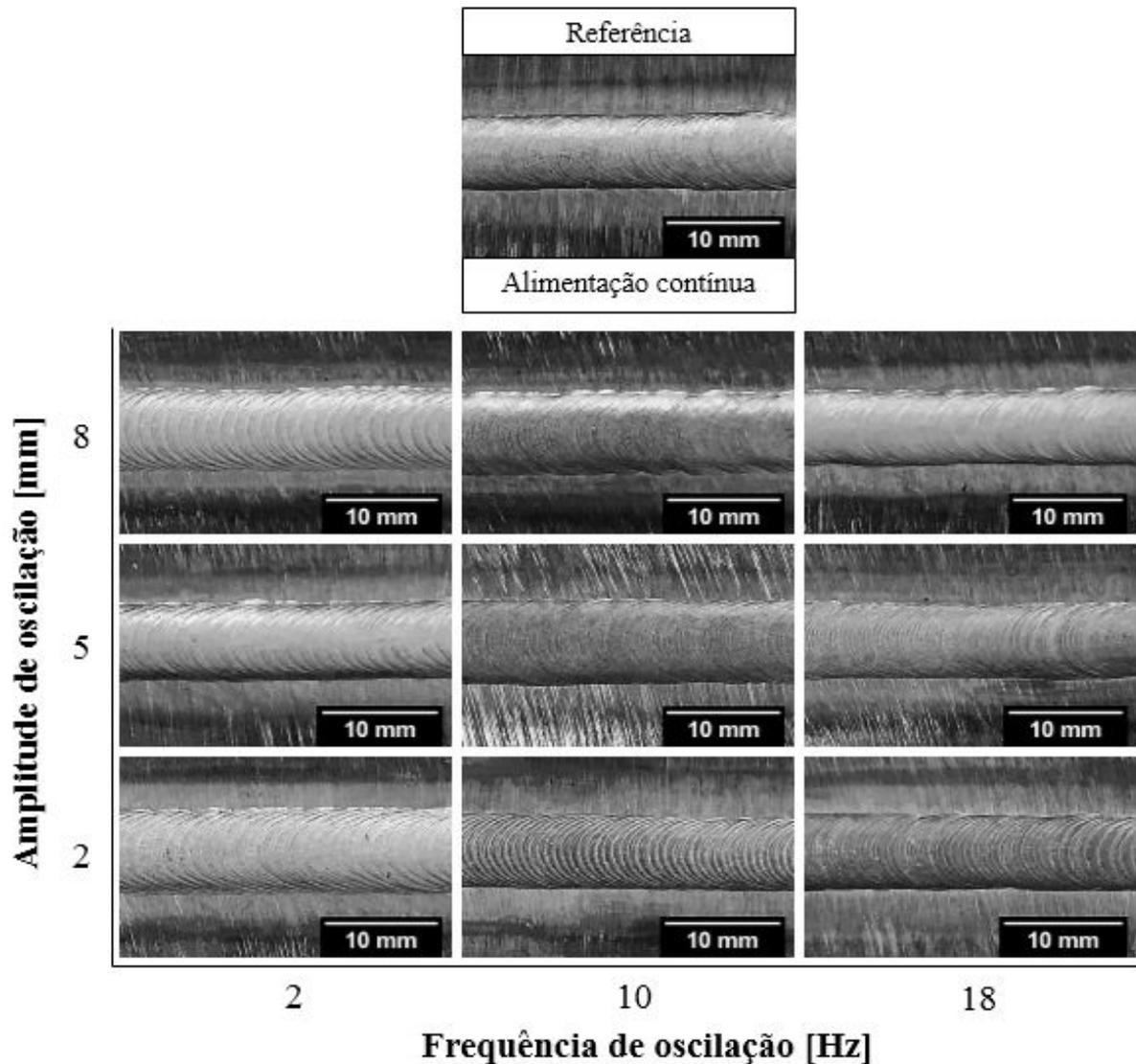
Quando se comparam os ciclogramas dos ensaios de referência com os respectivos ciclogramas das condições de oscilação longitudinal do arame, um sensível aumento na variação da tensão do arco pode ser percebido ao empregar-se a oscilação longitudinal, principalmente para as condições operacionais de arame enterrado e ponte contínua. Novamente, nessas condições operacionais observam-se poças de metal fundido com grande volume. Na medida em que se adiciona vibração a esse metal fundido, por intermédio da oscilação do arame, a altura da poça de fusão sofre sucessivas alterações no decorrer do processo de soldagem, o que contribue para o aumento sensível das variações da tensão do arco verificadas no caso da oscilação longitudinal do arame.

Apesar do aumento sensível na variação da tensão do arco por ocasião do emprego da oscilação longitudinal do arame, entende-se que as variações desse parâmetro observadas no processo estão dentro do que se obtém para uma condição de processo estável, tanto para as condições de referência quanto na aplicação da oscilação longitudinal, sendo percebida uma leve diminuição da estabilidade na medida em que se adiciona mais material na poça de fusão. Além disso, o impacto dessas variações na energia de soldagem é pequeno.

5.2.2 Avaliação inicial da face dos cordões

Neste item é realizada uma breve discussão acerca do aspecto superficial e da regularidade da face dos cordões obtidos em cada um dos ensaios descritos na Tabela 3. Na Figura 54 são apresentadas as faces dos cordões obtidos na condição operacional de transferência intermitente. Quando se compara a amostra de referência (alimentação contínua) com aquelas produzidas com oscilação longitudinal do arame, percebe-se que com a oscilação longitudinal os cordões tendem a apresentar um aspecto escamado em sua face, característica essa que é típica de cordões produzidos com o processo de soldagem TIG utilizando corrente pulsada. Dessa forma, percebe-se a possibilidade de se obter cordões de solda com o mesmo aspecto superficial daqueles produzidos com corrente pulsada, sem a necessidade de uma fonte de soldagem que possua a tecnologia para pulsar a corrente de soldagem. Ainda, em função da pequena quantidade de material depositado, que se acomoda em uma poça de metal fundido profunda (em relação às outras condições operacionais) conforme mostrado adiante, a condição operacional de transferência intermitente foi aquela que apresentou a maior regularidade na face e também nos contornos das margens dos cordões.

Figura 54 – Face dos cordões de solda obtidos na condição operacional de transferência intermitente.

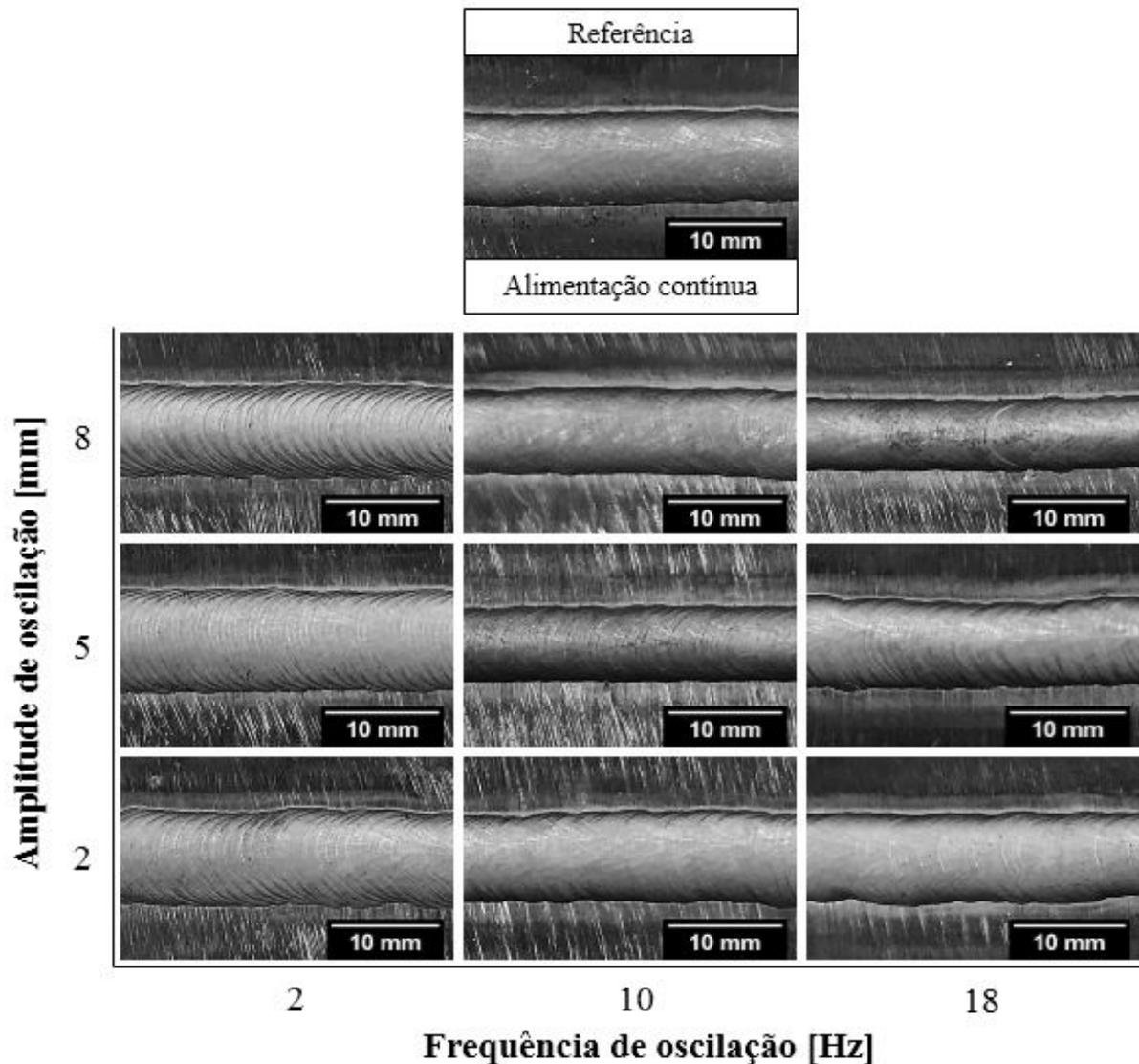


Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 55 são apresentadas as faces dos cordões de solda obtidos na condição operacional de ponte contínua. O mesmo efeito em termos da característica escamada da face dos cordões é observado nessa condição operacional para os cordões produzidos com oscilação longitudinal do arame e para a condição de arame enterrado (Figura 57). Ainda, em todas as condições operacionais aplicadas nesse estudo, percebe-se que na medida em que a frequência de oscilação é incrementada, o aspecto superficial dos cordões de solda tende a se aproximar mais da amostra de referência, ou seja, um cordão com a face lisa. Como esperado, isso acontece, pois na medida em que se aumenta a frequência de oscilação do arame alimentado, ocorre uma maior sobreposição do material que se solidifica na face, de maneira que as linhas

consecutivas que definem o formado escamado tendem a se sobrepor, dando origem a uma superfície mais suave.

Figura 55 – Face dos cordões de solda obtidos na condição operacional de ponte contínua.

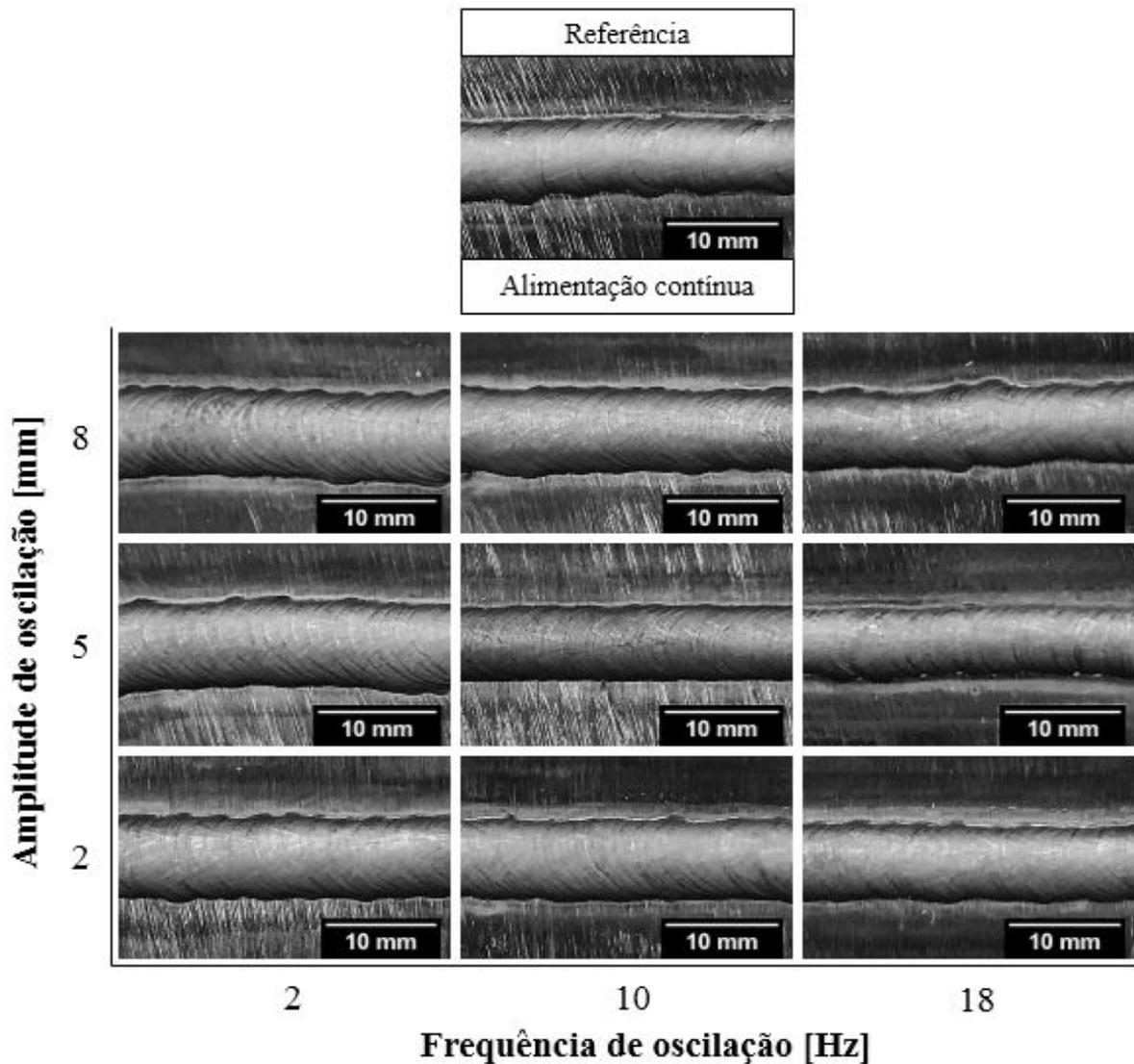


Fonte: Elaborado pelo autor.

Ressalta-se que a diminuição do efeito escamado da face dos cordões para maiores frequências de oscilação é dependente da velocidade de soldagem adotada. Apesar de no atual estudo a velocidade de soldagem não ser um parâmetro variável, ressalta-se que na medida em que maiores velocidades de soldagem são aplicadas, a tendência é que para uma mesma frequência de oscilação do arame mais espaçadas se apresentem as “escamas” da face dos cordões. Dessa forma, caso seja requisitado um aspecto superficial do cordão escamado e, ainda, demanda-se de frequências de oscilação do arame mais elevadas, recomenda-se a atuação

na velocidade de soldagem para alcançar tal efeito. Ainda, o oposto também é válido, ou seja, por ocasião da utilização da oscilação longitudinal do arame em baixas frequências de oscilação, com o requisito de se obter um cordão de solda com a face lisa, atua-se na velocidade de soldagem no sentido de diminuir a sua magnitude.

Figura 56 – Faces dos cordões obtidos na condição operacional de arame enterrado.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Em termos de regularidade da face, todos os ensaios realizados nesse estudo apresentaram resultados satisfatórios. No caso da condição operacional de arame enterrado (Figura 56), apesar de a face apresentar regularidade, são observadas irregularidades nas margens do cordão, que são resultado da adição de uma quantidade que se considera excessiva de material na poça de fusão. Estima-se que ao se adicionar o material ainda sólido enterrado na poça, até que o mesmo sofra fusão, é causada certa perturbação à poça, o que não é observado

nas demais condições operacionais. Tal perturbação, associada à redução da estabilidade do arco voltaico em seu acoplamento com o material de base, visto que se tem grande quantidade de material de adição depositado na poça de fusão, contribuem para as irregularidades observadas nas margens dos cordões nessa condição operacional.

5.2.3 Efeito da oscilação longitudinal do arame no tocante a porosidade

Apesar de não abordado na literatura pesquisada acerca da oscilação longitudinal do arame no processo de soldagem TIG, no atual estudo foram verificadas a presença de porosidades em parte dos cordões de solda obtidos. Por intermédio da avaliação das macrografias obtidas no estudo, foi verificado que nenhuma amostra de referência apresentou porosidades na zona de fusão. Além disso, quando a oscilação longitudinal do arame foi empregada na condição operacional de transferência intermitente, também não foram verificadas tais descontinuidades. No que se refere à condição operacional de ponte contínua porosidades foram encontradas em todas as amplitudes de oscilação, como mostra a Figura 57. No entanto, apenas para as duas maiores frequências de oscilação empregadas. Já para a condição operacional de arame enterrado, as porosidades foram verificadas em todas as frequências de oscilação, contudo, apenas para as duas maiores amplitudes de oscilação adotadas.

Figura 57 – Ensaio realizados com oscilação longitudinal do arame nos quais foram observadas descontinuidades do tipo porosidade.

Amplitude de oscilação [mm]		TI			PC			AE		
		2	10	18	2	10	18	2	10	18
8						X			X	X
5							X	X	X	X
2						X				
		2	10	18	2	10	18	2	10	18
		Frequência de oscilação [Hz]			Frequência de oscilação [Hz]			Frequência de oscilação [Hz]		

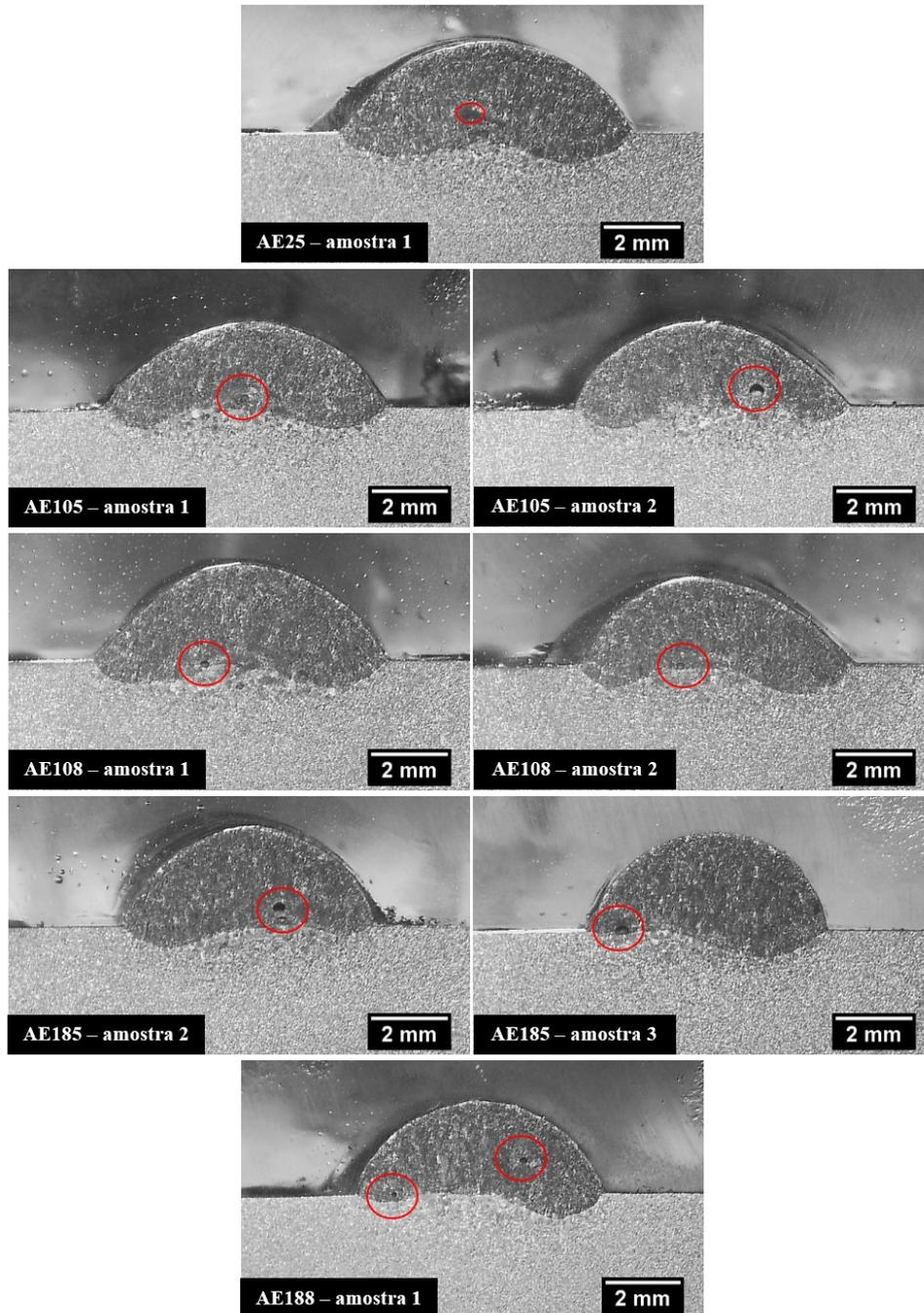
Fonte: Elaborado pelo autor.

A condição operacional de transferência intermitente (TI) é aquela que apresenta, dentre as três empregadas, o menor volume de metal fundido presente na poça de fusão, devido a menor velocidade de alimentação de arame imposta. Considerando este fato, entende-se que menor é a probabilidade de gases serem aprisionados (ou formados) na poça de fusão, dando

origem a porosidades. Além disso, o fato de apresentar menor volume de material também contribui para que mediante a presença de bolhas de gás na poça de metal fundido, essas possam ser expelidas pela agitação do material, que seria responsável por levar as bolhas até a superfície da poça.

No caso da condição operacional de arame enterrado (AE), para a menor amplitude de oscilação não são verificadas porosidades nos cordões. A hipótese levantada para justificar a presença de porosidades apenas para as maiores amplitudes é que o surgimento de tais descontinuidades estaria associada à oscilação da ponta sólida do arame através da interface da superfície da poça de fusão. A oscilação do material sólido através de tal interface ofereceria perturbação suficiente para causar a impregnação de gases no metal fundido. Dessa forma, para a menor amplitude de oscilação, considerando o arame enterrado, cogita-se que a oscilação imposta não foi capaz de retirar a ponta do arame de dentro da poça, impedindo a transição do arame pela superfície do metal fundido. Já para as outras amplitudes de oscilação, a ponta do arame faria tal transição, resultando nas porosidades que podem ser verificadas na Figura 58. Pelo maior volume da poça de fusão em comparação com a condição de ponte contínua (maior velocidade de alimentação do arame), as porosidades se apresentam desde a menor frequência de oscilação.

Figura 58 – Macrografias da seção transversal de cordões de solda das amostras obtidas na condição de arame enterrado com a presença de porosidades.

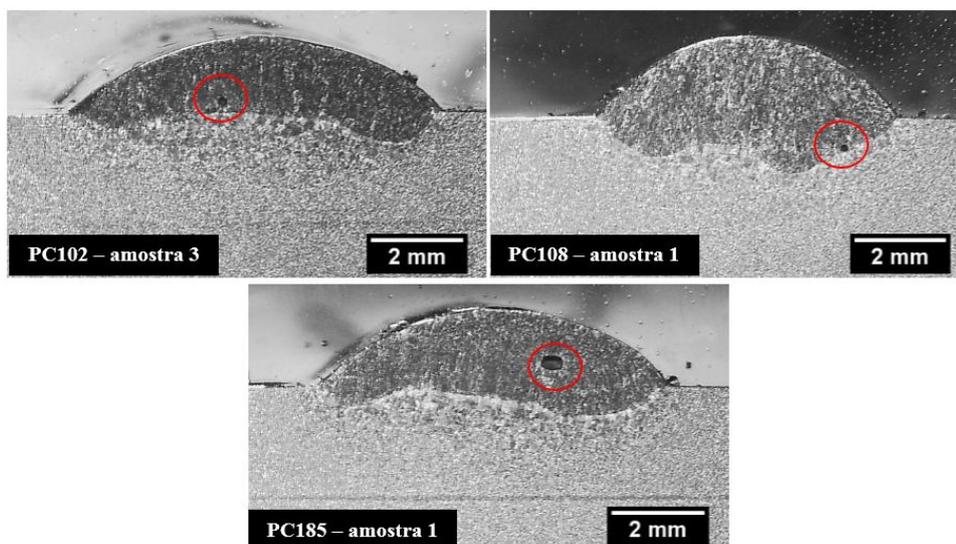


Fonte: Elaborado pelo autor.

No que se refere à condição operacional de ponte contínua (PC), observou-se a presença de poros para as maiores frequências de oscilação adotadas no estudo. A imposição de maiores frequência de oscilação resulta em maior agitação na poça de metal fundido. Entende-se que tal agitação é responsável por favorecer a adição de gases do ambiente à poça, já que a oscilação do arame na sua interface acontece com maior severidade. Na condição

operacional de ponte contínua, o posicionamento da ponta do arame em sua condição de referência é justamente no contato com a superfície da poça de fusão. Assim, qualquer amplitude de oscilação imposta a essa condição operacional é capaz de romper a ponte estabelecida e proporcionar a oscilação da ponta sólida do arame pela interface do metal fundido. Por esse motivo, já para a menor amplitude de oscilação é verificada a presença das descontinuidades, como mostra a Figura 59.

Figura 59 – Macrografias que evidenciam as porosidades das amostras obtidas na condição de ponte contínua.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Ainda, apesar de na condição operacional de transferência intermitente (TI) verificar-se a oscilação do arame através da interface da poça de fusão, como o arame em sua posição de equilíbrio se posiciona relativamente longe da superfície da poça, recebendo calor diretamente do arco voltaico durante seu movimento, ao chegar na poça de fusão a ponta do arame já se apresenta parcialmente fundida. Como o primeiro contato entre interface da poça de fusão e arame se dá entre duas porções de materiais no estado líquido, entende-se que menor é a severidade causada pela oscilação do arame pela interface da poça, mitigando o efeito de impregnação de gases do ambiente no metal fundido.

Por fim, no que se refere ao posicionamento das porosidades nas zonas de fusão, percebe-se que, apesar uma quantidade significativa de poros estarem localizados próximos a região da raiz dos cordões, existem descontinuidades posicionadas em regiões próximas ao centro da altura do cordão e também na margem, de maneira que é constatada uma distribuição aleatória dos poros identificados.

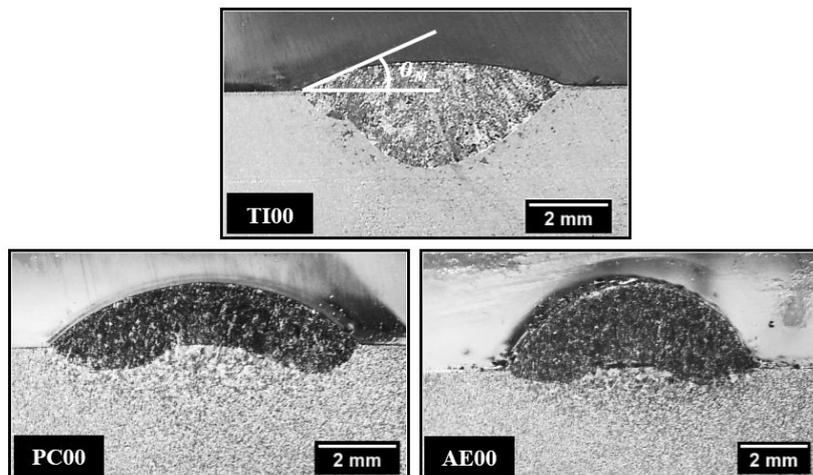
5.2.4 Efeito da oscilação longitudinal do arame sobre as características geométricas da zona de fusão

Como já mencionado, foram extraídas três amostras por cordão de solda para serem submetidas a macroscopia - condições operacionais descritas na Tabela 3. Na discussão que se segue é apresentada, para cada cordão realizado, a macrografia que melhor representa as características geométricas médias do cordão em questão. Já no Apêndice C são apresentadas todas as macrografias realizadas no estudo. No Apêndice D apresentam-se os dados obtidos a partir de medições realizadas nas imagens do Apêndice C, utilizados para geração dos gráficos que relacionam as características geométricas da ZF com as condições operacionais e variáveis da oscilação longitudinal do arame. Toda a discussão realizada no texto que se segue se restringe aos intervalos dos parâmetros da oscilação longitudinal adotados nesse estudo, bem como aos parâmetros que foram mantidos constantes em todos os ensaios de soldagem (Tabela 2).

5.2.4.1 Efeito da condição operacional

A Figura 60 agrupa as macrografias das seções transversais dos cordões associados as amostras de referência – alimentação contínua, sem oscilação do arame, para cada condição operacional empregada. Portanto, discute-se inicialmente a variação da morfologia da zona de fusão em função da condição operacional.

Figura 60 – Macrografias das seções transversais dos cordões associados as amostras de referência.



Fonte: Elaborado pelo autor.

No que se refere à morfologia dos cordões apresentados na Figura 60, o primeiro ponto a ser destacado é a alteração da penetração na raiz. No caso da transferência intermitente, tem-se uma região posicionada próximo ao centro da largura do cordão que concentra a maior penetração. Já no caso da transferência metálica por ponte contínua e no caso do arame enterrado, têm-se duas regiões próximas as margens do cordão onde se localizam os pontos de maior penetração, sendo a região do centro da largura caracterizada por apresentar a penetração menos profunda. No que se relaciona a penetração, não apenas alterações qualitativas são observadas com a mudança da condição operacional, mas também quantitativas. Uma queda de aproximadamente 61% foi observada na penetração média da condição em ponte contínua quando comparada com a condição de transferência intermitente. Quando a comparação é feita entre a condição de arame enterrado e transferência intermitente, a queda é ainda maior, de aproximadamente 72%.

Essas variações de penetração já eram esperadas. No caso do arame enterrado, tem-se o arame mergulhado na poça de fusão roubando parte do seu calor para ser fundido, o que resulta na diminuição significativa da penetração, já que se tem menos calor disponível para a fusão do material de base (resultando também na menor diluição observada entre as três condições operacionais). Além disso, como à condição de arame enterrado está associada uma maior velocidade de alimentação do arame, tem-se maior quantidade de material interposta entre arco e peça de trabalho (resultando no maior reforço do cordão), que funciona como uma resistência à transferência de calor para a fusão do material de base. A menor diluição e maior reforço para a condição de arame enterrado resultam em um maior ângulo de molhamento (θ_M , na Figura 60) para essa condição.

Quando se observa a condição operacional de transferência intermitente, percebe-se a transferência de material por gotas de metal fundido que são adicionadas à poça de fusão por efeito da tensão superficial. Como nessa condição não existe continuidade no contato entre arame e poça de metal fundido, o calor utilizado para a fusão do material de adição é entregue diretamente pelo arco voltaico ao arame, sendo o calor da poça de fusão preservado. Com a manutenção desse calor na poça de fusão, naturalmente, uma maior penetração é obtida – bem como maior diluição, menor reforço do cordão e menor ângulo de molhamento, já que se tem a menor quantidade de material sendo adicionada (dentre as três condições operacionais) em uma poça de fusão mais profunda.

Na condição operacional de ponte contínua, uma ponte metálica estável conecta o material de adição à poça de metal fundido durante todo o processo de soldagem. Uma quantidade inferior àquela observada no arame enterrado, porém, ainda significativa de calor é

extraída da poça para a fusão do arame de adição, resultando também na queda da penetração e em menor diluição para essa condição quando comparada com a condição de transferência intermitente. Uma quantidade menor de material é interposta entre arco e peça de trabalho nessa condição na comparação com o arame enterrado, já que se tem uma velocidade de alimentação do arame inferior. Assim, a condição de ponte contínua se apresenta como uma condição intermediária entre arame enterrado e transferência intermitente no que se relaciona a penetração, diluição e reforço.

Limmaneevichitr e Kou [40] afirmam que as formas de transferência de calor da poça de fusão estão intimamente ligadas à morfologia da zona de fusão resultante. Ao apresentar o número de Peclet (Pe) em seus estudos, os autores [40] afirmam que este número representa a relação entre o calor transferido por convecção ao ambiente (superfície da poça e laterais das chapas que compõem o material de base) e o calor transferido por condução (por meio do material de base). Para números de Peclet superiores a 1, a transferência de calor seria majoritariamente por convecção, sendo que para valores inferiores a 1, por condução. Cordões com penetração concentrada no centro de sua largura, como aqueles obtidos na condição de transferência intermitente no atual trabalho, estariam associados a transferência majoritária de calor por condução ($Pe \ll 1$). Já cordões que apresentam região central da largura com penetração rasa, com maiores valores de penetração nas margens, estariam associados à transferência predominante por convecção ($Pe \gg 1$), o que acontece nas condições operacionais de arame enterrado e ponte contínua do atual estudo.

Nas condições operacionais de arame enterrado e ponte contínua, como já discutido, maior é o reforço dos cordões e menor a sua diluição. Desta forma, grande área de material fundido se expõe ao ambiente favorecendo a transferência de calor por convecção logo após a passagem do arco voltaico, dando origem à morfologia ressaltada e ratificada pelo estudo [40]. O mesmo raciocínio se aplica a condição operacional de transferência intermitente. Com uma poça fundida de menor volume, apresentando, ainda, pouco reforço e elevada diluição, tem-se menor transferência de calor por convecção, sendo esta majoritariamente por condução.

Com relação à variação da largura dos cordões apresentados na Figura 60, percebe-se que a condição de ponte contínua é aquela que apresenta o maior valor de largura, seguida pela condição de arame enterrado, sendo a condição de menor largura a transferência intermitente. Com relação a variação de largura entre as condições de arame enterrado e ponte contínua, a hipótese levantada é que como a quantidade de material depositada na condição de arame enterrado é maior, exigindo maior quantidade de calor para fundi-la, menor é o aporte de calor à peça, diminuindo o tamanho da poça e, portanto, a sua largura. No entanto, o mesmo

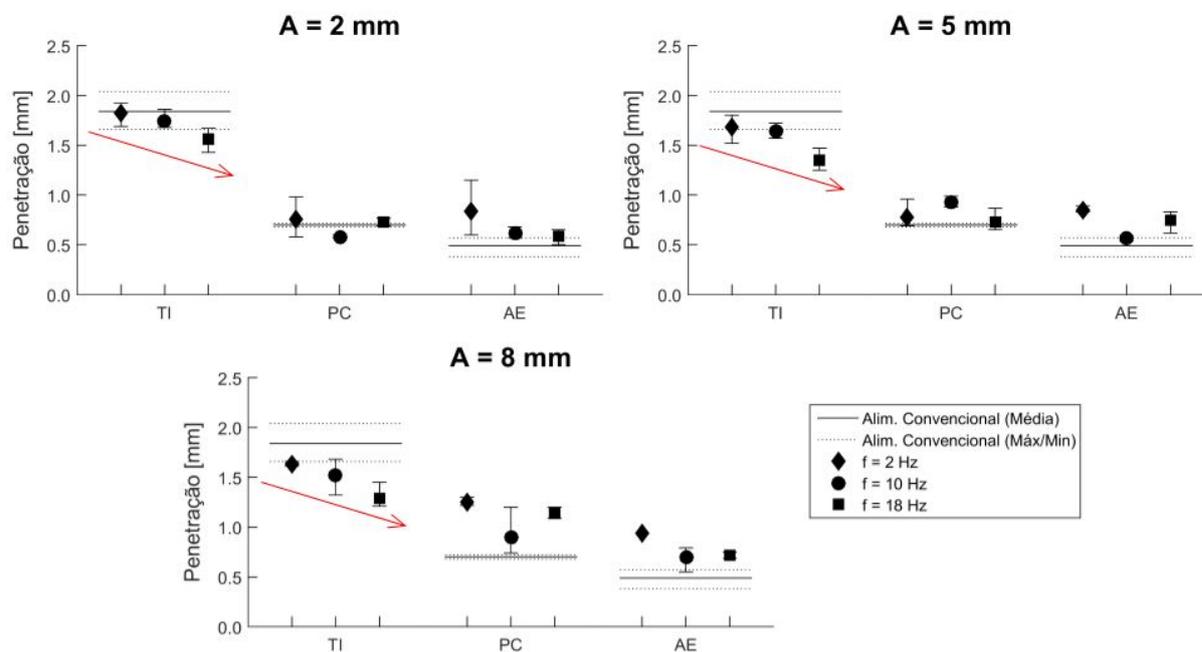
raciocínio não se aplica à condição operacional de transferência intermitente, já que essa possui a menor quantidade de material depositado dentre as condições operacionais adotadas e, portanto, deveria apresentar a maior largura da zona de fusão. Nesse caso, a hipótese levantada é que como a transferência de calor se dá majoritariamente por condução, devido a própria geometria da raiz da ZF, como apresentado pelo estudo [40], a direção principal do fluxo de calor se dá no sentido da espessura da chapa, e não lateralmente, o que resulta na menor largura observada.

No tocante a variação da área fundida em função da condição operacional, apesar de não ser possível evidenciar com clareza essa variação pela observação da Figura 60, tem-se um aumento na área fundida para maiores velocidades de alimentação do arame, ou seja, a maior área fundida se associa à condição operacional de arame enterrado, sendo que a menor é aquela associada à transferência intermitente – com a condição de ponte contínua se apresentando como intermediária. Quantitativamente essas variações podem ser percebidas na Figura 67. Esses resultados são intuitivos, uma vez que na medida em que se adiciona mais material na poça de fusão, maior tende a ser a área fundida.

5.2.4.2 Efeito da oscilação longitudinal do arame na penetração dos cordões

Uma vez discutidas as alterações nas características geométricas dos cordões decorrentes da mudança na condição operacional, são apresentados na Figura 61 gráficos de penetração em função da condição operacional, da frequência e amplitude de oscilação longitudinal do arame. Em cada um dos gráficos, no eixo das ordenadas são apresentados os valores de penetração. Já o eixo das abcissas é dividido em três regiões distintas, uma para cada condição operacional. Dentro de cada região do eixo das abcissas são apresentadas, através de marcadores, as médias dos valores de penetração (média entre as três amostras) para cada condição de frequência de oscilação, juntamente com suas barras de erro. Para cada região, identificou-se ainda com uma linha contínua os patamares associados à penetração média das condições de referência, ou seja, para a condição operacional em questão, porém com alimentação contínua. As linhas pontilhadas representam, assim como a barra de erro para os marcadores, a dispersão dos resultados para as amostras de referência. Finalmente, mediante a observação de tendências em função da variação da frequência de oscilação, indica-se tais tendências por meio de setas vermelhas.

Figura 61 – Penetração em função da condição operacional, frequência e amplitude de oscilação longitudinal do arame.



Fonte: Elaborado pelo autor.

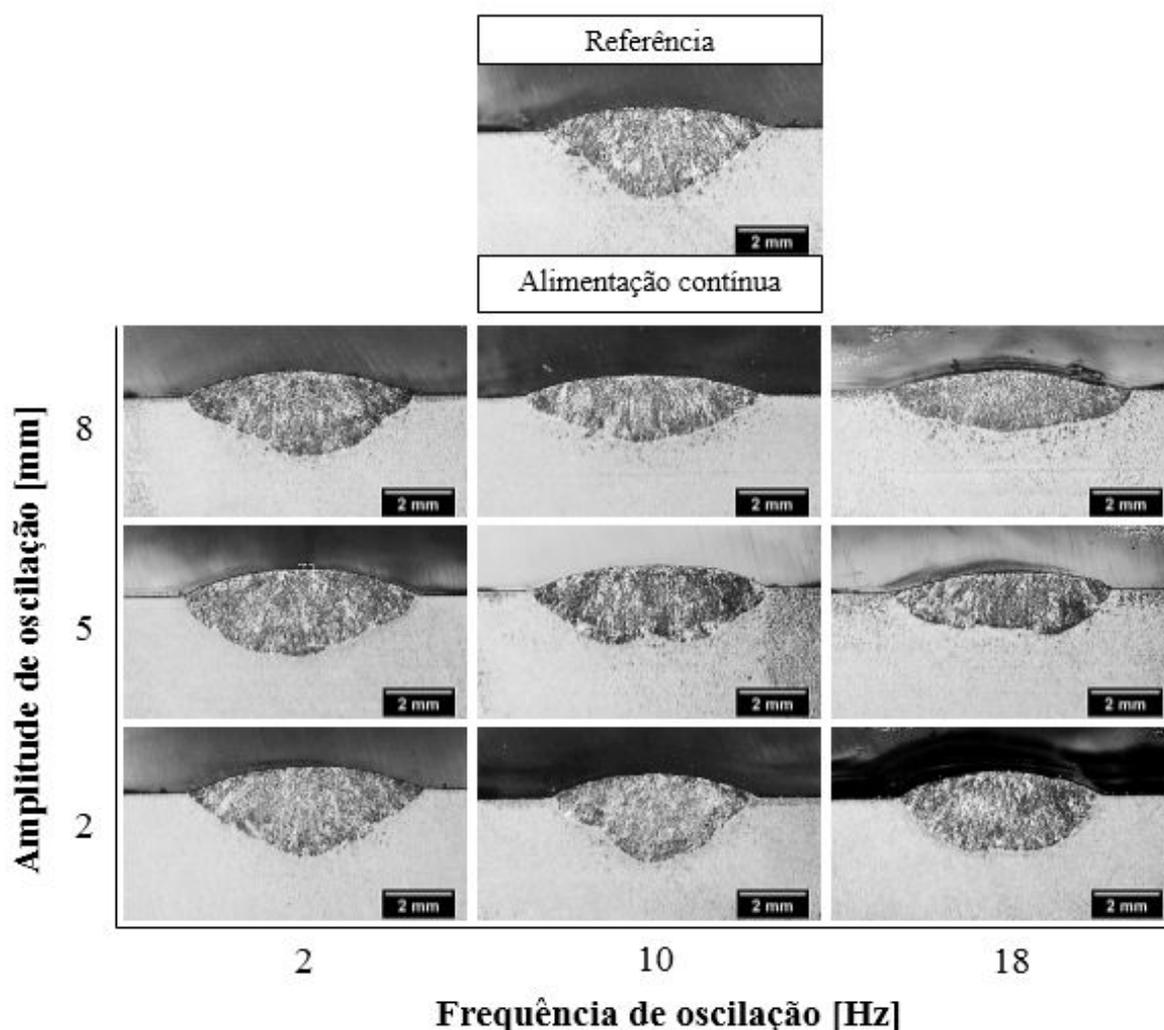
Quando se observa na Figura 61 a condição operacional de transferência intermitente, para todas as amplitudes e frequências de oscilação é observada uma tendência de queda na penetração em comparação a amostra com alimentação contínua (até 28%, nos ensaios TI185 e TI188). Essa tendência de queda é acentuada para maiores valores de amplitude de oscilação e também para maiores frequências de oscilação. Na Figura 62 são apresentadas as macrografias das amostras obtidas na condição operacional de transferência intermitente.

Na transferência intermitente, quando o arame passa a oscilar, sua ponta entra e sai da poça de fusão periodicamente (o que não acontece na condição de alimentação contínua). Riffel [39] mostra que ocorre uma diminuição da temperatura da poça quando a oscilação longitudinal do arame é empregada, e associa tal resultado ao fato do arame adentrar a poça de fusão durante o seu movimento de avanço. De fato, entende-se que o material de adição parcialmente sólido adentrando a poça de metal fundido (que possui temperatura significativamente superior), tende a causar um queda de temperatura local no metal fundido, de maneira que pelo mecanismo de convecção, o metal líquido tende a transferir calor ao arame. Como uma menor energia em forma de calor é mantida na poça, menor tende a ser a sua penetração, como ratificado por Riffel [39] em seu trabalho.

Quando o arame entra em contato com o metal fundido em seu movimento de avanço, recebe calor por convecção e o conduz em direção ao comprimento de arame que vem do

cabeçote tracionador. Desta forma, em maiores amplitudes de oscilação, o volume de metal frio que adentra a poça recebendo calor por convecção é maior. Portanto, levanta a hipótese de que mais calor é extraído do metal fundido, resultado na maior queda de penetração observada.

Figura 62 – Macrografias das seções transversais das amostras obtidas na condição operacional de transferência intermitente.



Fonte: Elaborado pelo autor.

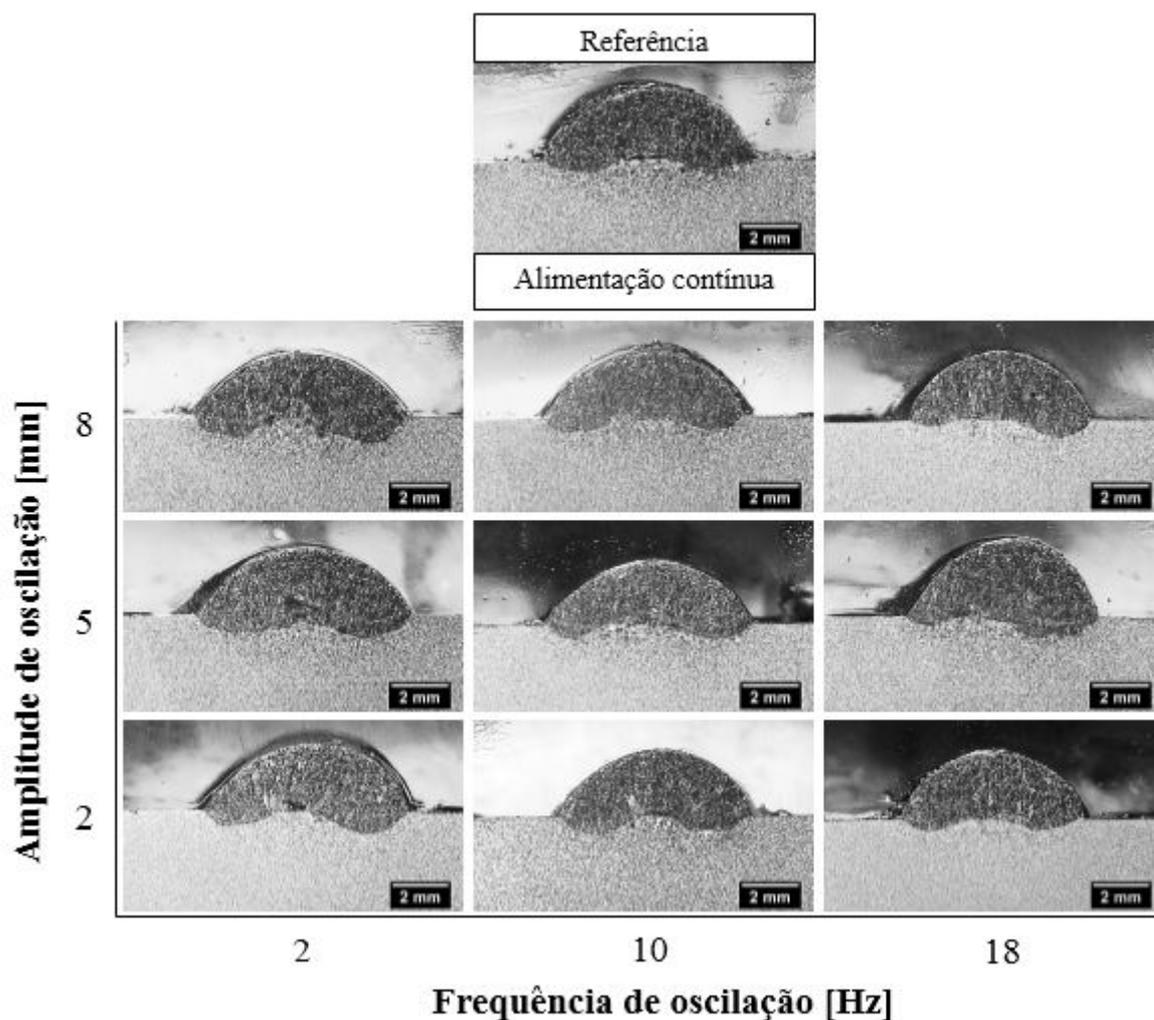
A hipótese levantada para a maior queda na penetração em maiores frequências de oscilação também se associa à transferência de calor da poça de fusão para o arame de adição. Quando o arame adentra a poça e permanece no período de estagnação de avanço, estaria extraíndo calor da poça e o conduzindo em direção a parcela de arame que vem do cabeçote tracionador, como já mencionado. Em frequências mais baixas, o arame permanece por maior período de tempo nessa posição de avanço, de maneira que em poucas oscilações ganharia temperatura suficiente de modo a mitigar a extração de calor da poça de metal fundido, o que

seria responsável por diminuir a eficiência de extração de calor da poça para baixas frequências de oscilação. Em maiores frequências, o tempo de permanência do arame em contato com o metal fundido é significativamente menor, de maneira que as oscilações pela poça de fusão teriam que ocorrer um número maior de vezes para que o arame atingisse a mesma temperatura alcançada em menores frequências. Assim, como o arame é aquecido “aos poucos” para maiores frequências de oscilação, levanta-se a hipótese de que maior é a eficiência de extração de calor da poça de fusão nessas condições, causando uma queda mais acentuada na penetração.

Entende-se que uma possível perda de calor do arame para o ambiente em seu movimento de recuo, que poderia potencializar a queda de penetração observada para a condição operacional de transferência intermitente, não seria expressiva em função do posicionamento do arame muito próximo ao arco voltaico na posição de estagnação de recuo, estando sujeito a intensa radiação luminosa.

Na condição operacional de arame enterrado, com maior expressão para as amplitudes de 5 e 8 mm, observa-se uma tendência de aumento na penetração quando é empregada a oscilação longitudinal na comparação com a amostra de referência (até cerca de 80%, no ensaio AE28), sendo que a frequência de oscilação não causa efeitos significativos. Na Figura 63 são apresentadas as macrografias das amostras obtidas na condição operacional de arame enterrado.

Figura 63 – Macrografias das seções transversais das amostras obtidas na condição operacional de arame enterrado.



Fonte: Elaborado pelo autor.

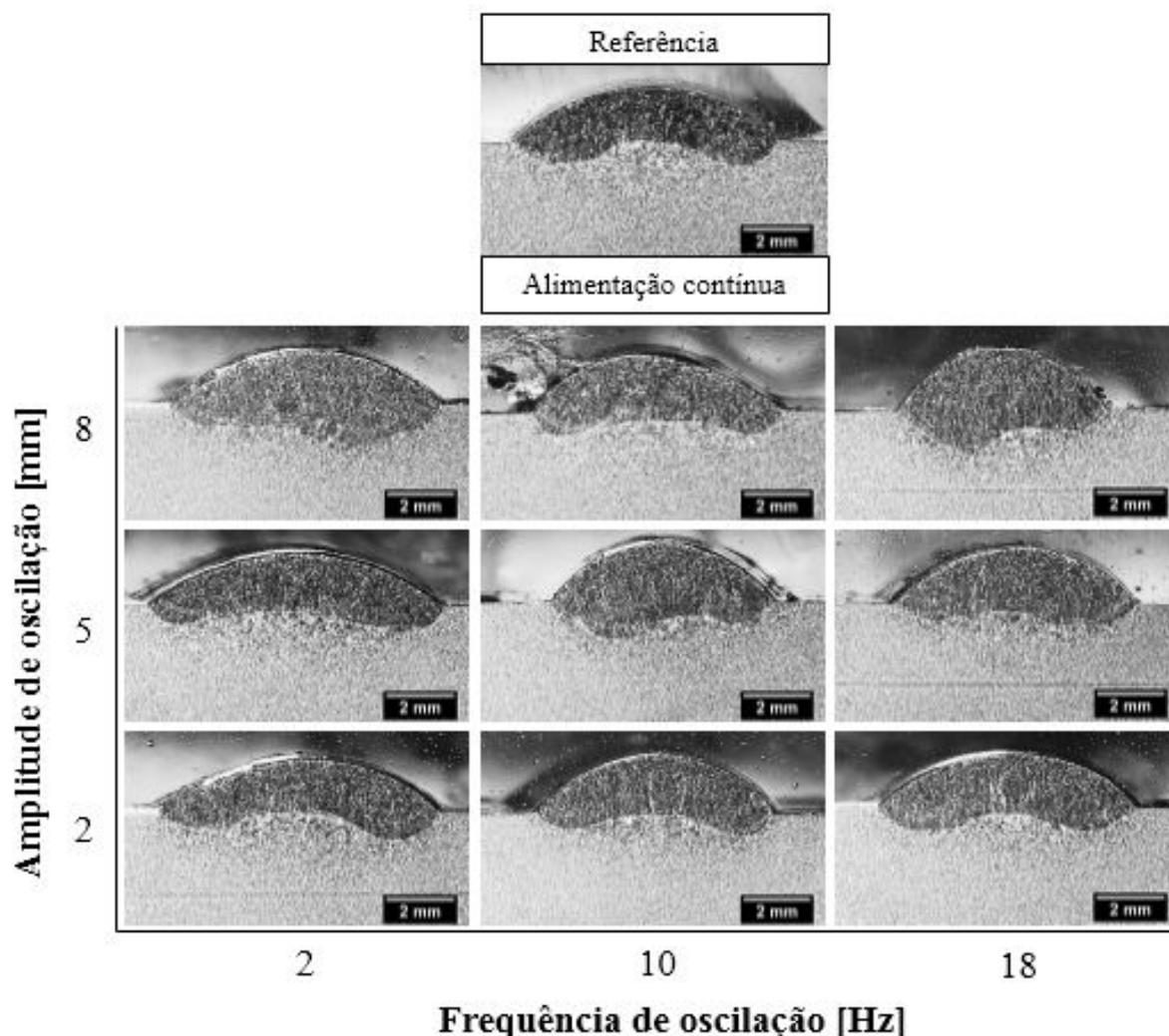
Com o arame enterrado na poça de fusão, a hipótese levantada é que quando a oscilação se inicia, o arame que antes permanecia continuamente absorvendo calor da poça para a sua fusão, se posiciona agora periodicamente fora do metal fundido, recebendo calor diretamente do arco voltaico para a sua fusão. Assim, a manutenção do calor na poça seria responsável por aumentar a penetração.

Para a condição operacional de ponte contínua, a oscilação do arame apresenta a tendência do aumento da penetração na comparação com a condição de referência para as amplitudes de 5 e 8 mm (até 86%, no ensaio PC28), sem efeitos aparentes associados a variação da frequência de oscilação. Na Figura 64 são apresentadas as macrografias das amostras obtidas na condição operacional de ponte contínua.

Na ponte contínua, quando o arame é alimentado continuamente, a sua extremidade fica em contato permanente com a região superficial da poça de metal fundido. Quando se

introduz a oscilação, o arame passa a adentrar a poça de fusão e se posiciona fora dela periodicamente. Para o menor valor de amplitude de oscilação, estima-se que a extremidade do arame esteja posicionada em uma região ainda muito próxima da superfície da poça de fusão, oscilando em torno dela, sendo que um volume de arame frio que adentra a poça não parece ser expressivo – o arame rouba pouco calor da poça e no movimento de recuo permanece na região do arco voltaico. Quando se regulam maiores amplitudes de oscilação, os efeitos térmicos tendem a ser observados novamente, e se assemelham muito àqueles observados para a condição de arame enterrado. O arame parece não permanecer mais em contato direto com a superfície da poça de fusão absorvendo parte do seu calor, e em seu movimento de recuo parece se estabilizar em uma região com proximidade suficiente ao arco voltaico de maneira a não transferir calor ao ambiente, resultando no balanço final de efeitos em um aumento da penetração.

Figura 64 – Macrografias das seções transversais das amostras obtidas na condição operacional de ponte contínua.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Ainda, a Figura 64 indica que a oscilação longitudinal do arame proporcionou uma pequena alteração morfológica (associada à penetração na raiz) nos cordões de solda para essa condição operacional. Quando se observa a região da raiz do cordão de referência tem-se uma região próxima ao centro do cordão com uma penetração rasa. Quando a oscilação longitudinal do arame é empregada, devido à agitação mecânica do material, levanta-se a hipótese de alteração no perfil de convecção de calor dentro da poça, que tende a concentrar a penetração no centro do cordão. Essa hipótese foi também levantada por Jorge et al. [7] para justificar efeito semelhante de variação no perfil de penetração. Apesar do efeito nesse estudo não ser tão expressivo como o reportado por Jorge et al. [7], percebe-se a diminuição na extensão da região central com penetração rasa, que terá efeitos pronunciados sobre a diluição das amostras na condição operacional de ponte contínua.

Na execução do seu trabalho, Jorge et al. [7] adotou a condição operacional de transferência intermitente. Ao aplicar a oscilação longitudinal em frequência de oscilação de 15 Hz e amplitude de 8 mm, observaram um aumento na penetração. A tecnologia empregada por Jorge et al. [7] para promover a oscilação longitudinal do arame faz com que o arame se distancie da poça no movimento de recuo, não a adentrando posteriormente. Desta forma, levanta-se a hipótese de que por não adentrar a poça e, conseqüentemente, não extrair seu calor, a penetração aumenta nessa condição operacional associada a tecnologia empregada. Assim, os resultados diferem do atual estudo (já que aqui foi observada uma tendência de queda da penetração com a oscilação longitudinal do arame) não pela diferença de condição operacional adotada, mas pela tecnologia empregada para a oscilação longitudinal do arame.

Já o estudo de Silva et al. [6] relata a adoção da condição operacional de *bridge transfer*, que associada a exposição gráfica que demonstra contato ininterrupto da ponta do arame com a poça (na condição de alimentação contínua), permite inferir que se trata de uma condição semelhante à de ponte contínua adotada no atual trabalho. Silva et al. [6] relatam não ter encontrado alterações significativas em termos de penetração ao aplicar a oscilação longitudinal do arame em frequências de oscilação de 1 e 2 Hz com amplitudes de 7,2 e 3,6 mm, respectivamente.

Na condição operacional de ponte contínua, como já discutido quando o arame faz o movimento de recuo, levanta-se a hipótese de que ele ainda permaneça numa região relativamente próxima ao arco voltaico, de maneira que a perda de calor ao ambiente é mitigada. Assim, o arame que antes estava em contato direto com a poça extraindo calor, passa a ter um maior aproveitamento do calor do arco voltaico para a sua fusão, permitindo a manutenção do calor da poça. Na tecnologia adotada por Silva et al. [6], na qual o arame possui tanto movimento de avanço quanto de recuo, existe um balanço entre o calor extraído da poça e o melhor aproveitamento do calor do arco durante o movimento de recuo para a fusão do próprio arame que, aliás, por se posicionar no recuo próximo ao arco, tem a transferência de calor ao ambiente mitigada. Por esse motivo, pode ser que os efeitos da oscilação longitudinal do arame nessa condição operacional não tenham sido percebidos por Silva et al. [6].

Ainda, com a utilização do dispositivo concebido no atual estudo, que permite a oscilação do arame tanto na direção de avanço quanto de recuo, assim como a tecnologia adotada por Silva et al. [6], os efeitos da oscilação longitudinal do arame puderam ser notados para as maiores amplitudes de oscilação, como já discutido. Assim, entende-se que o balanço dos efeitos descritos para a condição operacional de ponte contínua, que se apresenta claramente como uma condição intermediária entre a transferência intermitente e arame enterrado, é muito

sensível no que diz respeito aos resultados obtidos, sendo que mais estudos seriam necessários para investigar estes fatos.

Silwal e Santangelo [35] e o Laboratório de Tecnologia da Soldagem (LTS) [10] realizaram os seus estudos na condição operacional de transferência intermitente, sendo que os autores [35] relatam a inobservância de variação da penetração ao aplicar a oscilação longitudinal do arame em frequência de oscilação de 16 Hz, e o estudo do LTS [10] relata uma sensível diminuição nessa característica geométrica do cordão ao oscilar o arame em frequência de 20 Hz.

Assumindo a eficiência térmica do processo como 100%, apenas para fins comparativos, considerando os valores médios de corrente de soldagem e tensão de arco medidos (Tabela 2), bem como a velocidade de soldagem adotada, a energia de soldagem utilizada nos ensaios do atual trabalho foi de aproximadamente 762 J/mm. No estudo de Silwal e Santangelo [35], assumindo a mesma eficiência térmica do processo, a energia de soldagem utilizada foi de 480 J/mm. Ainda, Silwal e Santangelo [35] não informam a espessura das chapas utilizadas em seus estudos, no entanto analisando imagens apresentadas no trabalho é possível concluir que no mínimo a espessura das chapas utilizadas foi de 6,5 mm. Dessa forma, entregando uma energia significativamente menor ao material e, ainda, utilizando uma chapa de aço carbono com uma espessura maior em pelo menos 30% aquela utilizada no atual estudo, entende-se que os autores [35] não perceberam os efeitos da oscilação longitudinal do arame na penetração das soldas não porque os efeitos são inexistentes para a condição operacional de transferência intermitente, mas porque os parâmetros utilizados no processo não favoreceram tal verificação, devido a um baixo aporte térmico.

Ainda, no que se refere a tecnologia adotada por Silwal e Santangelo [35] para promover a oscilação longitudinal do arame, os autores indicam em seu estudo que a oscilação ocorre na região do cabeçote tracionador. Desta forma, infere-se a utilização de tecnologia semelhante ao TIP TIG. Considerando que nessa tecnologia devido ao efeito mola o recuo do arame pode ser mitigado (o que não acontece com o dispositivo concebido no atual estudo), com a oscilação longitudinal o arame passaria a roubar calor da poça para sua fusão, sendo a extração de calor para sua fusão (e posterior condução pelo arame como já discutido) suficiente para promover uma redução da temperatura da poça de fusão e, conseqüentemente, diminuir a penetração. No entanto, isso não é observado no estudo [35], de maneira que a hipótese levantada no parágrafo anterior que se associa ao aporte térmico é mantida para justificar a inobservância de variação da penetração com a utilização da oscilação longitudinal do arame.

No estudo do LTS [10], apesar de sido utilizado chapas de aço carbono de 6,35 mm e não se apresentar a tensão média do arco para o cálculo da energia de soldagem, foi utilizada uma velocidade de soldagem menor do que aquela utilizada no estudo de Silwal e Santangelo [35] (20 cm/min contra 24 cm/min), com uma distância eletrodo peça sensivelmente maior (4 mm contra 3,5 mm). Assim, com o conhecimento de que ambos os estudos utilizaram aproximadamente a mesma corrente média de soldagem (150 A) e que a tensão de arco não exerce influência tão grande sobre a energia de soldagem quanto à corrente de soldagem neste caso – já que apresentam diferentes ordens de grandeza, entende-se que a energia entregue ao material no estudo [10] foi mais próxima daquela utilizada no atual estudo. Dessa forma, embora não relate resultados expressivos, o estudo [10] concorda com a tendência de redução na penetração quando se adota a oscilação longitudinal para a condição operacional de transferência intermitente. Ademais, a mesma hipótese associada as diferentes técnicas utilizadas para promover a oscilação longitudinal do arame descrita no parágrafo anterior se aplica aqui, já que o dispositivo utilizado no estudo [10] também não possui o movimento de recuo mitigado.

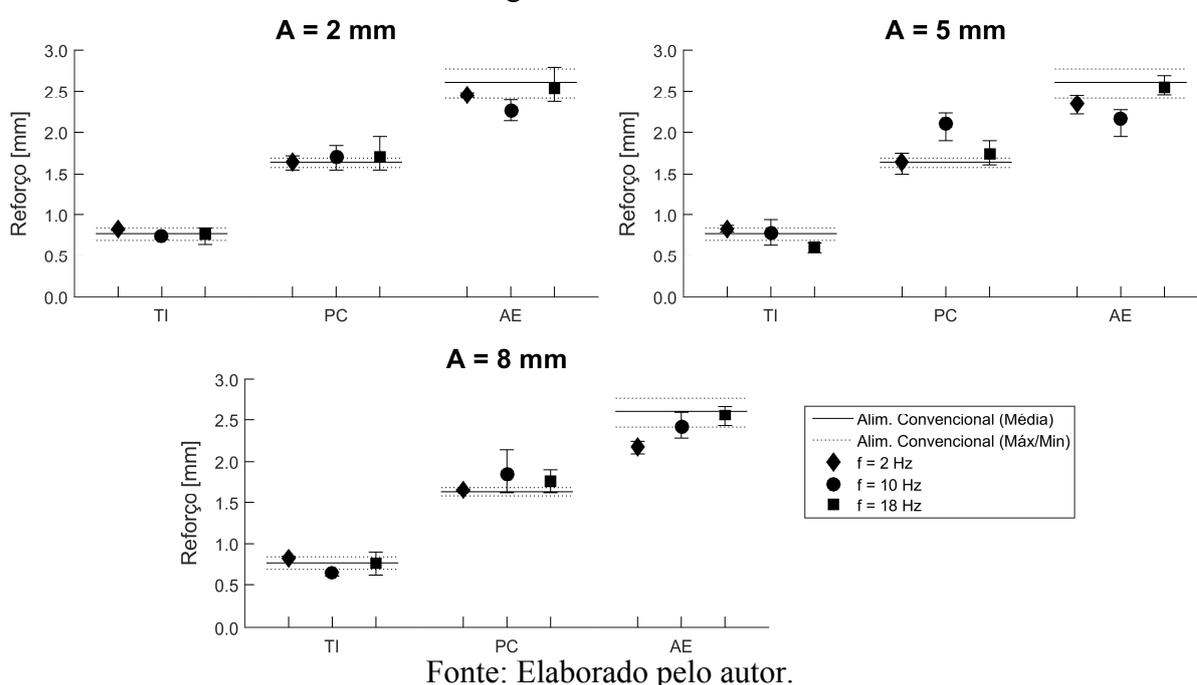
5.2.4.3 Efeito da oscilação longitudinal do arame no reforço dos cordões

De maneira análoga a Figura 61, na Figura 65 são apresentados os gráficos de variação do reforço em função da condição operacional, frequência e amplitude de oscilação do material de adição.

No que se refere à condição operacional de transferência intermitente, em função da pequena quantidade de material que é depositada na poça de fusão, não são observados efeitos significativos sobre o reforço dos cordões quando a oscilação longitudinal do arame é empregada. Já para a condição operacional de ponte contínua, para as frequências de 10 e 18 Hz foi observada uma tendência de aumento do reforço (até 31%, no ensaio PC105). A hipótese levantada por Riffel et al. [5] para explicar efeito semelhante se associa a tensão superficial da poça de metal fundido. Quando o arame faz o seu movimento de recuo, devido a tensão superficial existe a tendência de “puxar” o metal fundido para cima, aumentando o reforço do cordão e diminuindo a sua largura. No entanto, entende-se que o metal líquido teria que ter uma elevada viscosidade para isso ocorrer. Se a alimentação do arame ocorresse atrás da poça, a hipótese seria mais justa, mas como a alimentação é a frente, esta hipótese se torna menos expressiva, apesar de ser válida. O aumento do reforço com a utilização da oscilação longitudinal do arame nessa condição operacional também é relatado por Jorge et al. [7]. Os

autores [7] justificam o aumento do reforço pela diminuição da tensão do arco com a oscilação longitudinal do arame, que resultaria em uma menor energia de soldagem e, conseqüentemente a uma menor quantidade de calor entregue a peça, causando um menor molhamento e espalhamento do metal fundido, resultando em uma poça de menor largura e maior reforço. No atual estudo não foram verificadas quedas expressivas da tensão do arco em função da aplicação da oscilação longitudinal do arame.

Figura 65 – Reforço em função da condição operacional, frequência e amplitude de oscilação longitudinal do arame.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na condição operacional de arame enterrado, o movimento de recuo do arame para fora da poça de metal fundido é menos expressivo do que no caso da ponte contínua. Isso se dá por dois motivos: como está sendo depositado mais material, a poça de fusão tem maior volume, logo o percurso do arame no movimento de recuo que se encontra fora da poça de fusão é menor. Além disso, a posição de equilíbrio em torno da qual a ponta do arame faz o seu movimento de avanço e recuo está localizada dentro da poça de fusão, resultando também em um menor percurso do arame fora da poça durante seu movimento de recuo. Como o arame se movimenta pouco fora da poça, o efeito associado desse movimento com a tensão superficial do metal fundido para o aumento do reforço se torna pouco expressivo. Por outro lado, como grande parte do movimento de oscilação é feito dentro da poça de fusão, que na condição de arame enterrado tem grande volume, promove-se grande agitação de material nessa região. Acredita-se que essa agitação seja responsável pelo “espalhamento” do metal fundido, que teria

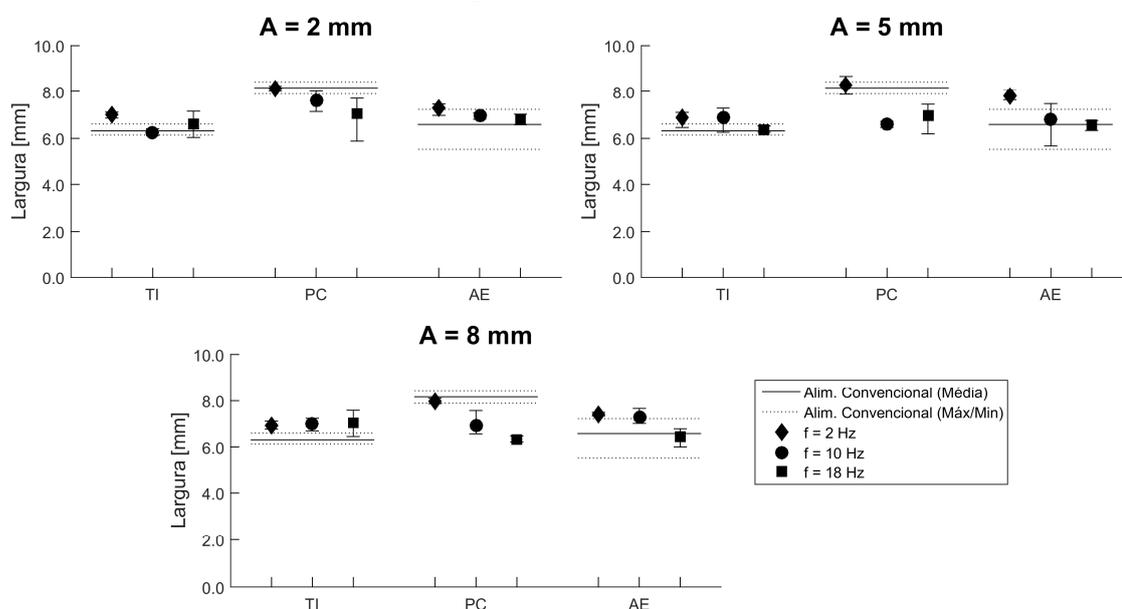
o efeito de diminuição do reforço (até 15%, nos ensaios AE28 e AE105) e aumento da largura dos cordões. O aumento da frequência de oscilação, apesar de intuitivamente impor maior agitação ao metal fundido, não parece tornar esse efeito mais expressivo.

5.2.4.4 Efeito da oscilação longitudinal do arame na largura dos cordões

Na Figura 66 são apresentados os gráficos de largura dos cordões em função da condição operacional, da frequência e amplitude de oscilação do material de adição.

A análise dos resultados de largura dos cordões corroboram a discussão realizada acerca dos resultados de reforço (Figura 65). Para a condição operacional de ponte contínua, considerando ainda a hipótese do efeito da tensão superficial, que poderia incrementar o reforço do cordão, existe a tendência de diminuição da largura (até 23%, no ensaio PC188) com a utilização da oscilação longitudinal do arame, já que o material antes depositado próximo as margens dos cordões agora é solidificado na região de reforço. Resultados semelhantes foram obtidos por Riffel et al. [5] e Jorge et al. [7]. A variação da frequência de oscilação não demonstrou efeitos expressivos.

Figura 66 – Largura em função da condição operacional, frequência e amplitude de oscilação longitudinal do arame.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na condição operacional de arame enterrado, notou-se a tendência de aumento na largura dos cordões (até 18%, no ensaio AE25) em função da inerente agitação imposta à poça de metal fundido pela oscilação longitudinal do arame, que espalharia o material para mais

próximo das regiões das margens dos cordões. Essa tendência de aumento na largura dos cordões para a condição operacional de arame enterrado, assim como a tendência de redução do reforço, acontece de maneira mais expressiva para as frequências de oscilação de 2 e 10 Hz. Portanto, mais estudos são necessários para entender esse comportamento, já que com o aumento da frequência de oscilação era esperado se obter maior agitação imposta a poça de fusão e, conseqüentemente, maior largura dos cordões.

Para a condição operacional de transferência intermitente, assim como na condição operacional de arame enterrado, valores levemente superiores àqueles das amostras de referência para a largura dos cordões puderam ser observados (até 13%, no ensaio TI188), principalmente para as amplitudes de oscilação de 5 e 8 mm. Como no caso da transferência intermitente não se tem material depositado suficiente para que o efeito da tensão superficial aumente o reforço e, conseqüentemente, diminua a largura, predomina-se nessa condição operacional o efeito associado a agitação mecânica do metal fundido resultado da oscilação do arame, que é mais expressivo para as maiores amplitudes de oscilação. A hipótese que se levanta é que assim como no arame enterrado, a agitação da poça de fusão faz com que ocorra a movimentação do metal fundido em direção as paredes da poça, transferindo calor para essas regiões e resultando no aumento sensível da largura.

Ressalta-se que a utilização da oscilação longitudinal do arame, em função dos efeitos opostos sobre as condições operacionais de arame enterrado e ponte contínua, apresentou a tendência de uniformizar a largura dos cordões em todos os ensaios. Ou seja, quando se observa os valores médios de largura para as diferentes condições operacionais dos ensaios com alimentação contínua, percebe-se uma clara diferença de patamares. Quando a oscilação longitudinal do arame é empregada essa diferença é minimizada, sendo que nas três condições operacionais obteve-se valores médios de largura muito próximos, independentemente da frequência e da amplitude de oscilação empregadas.

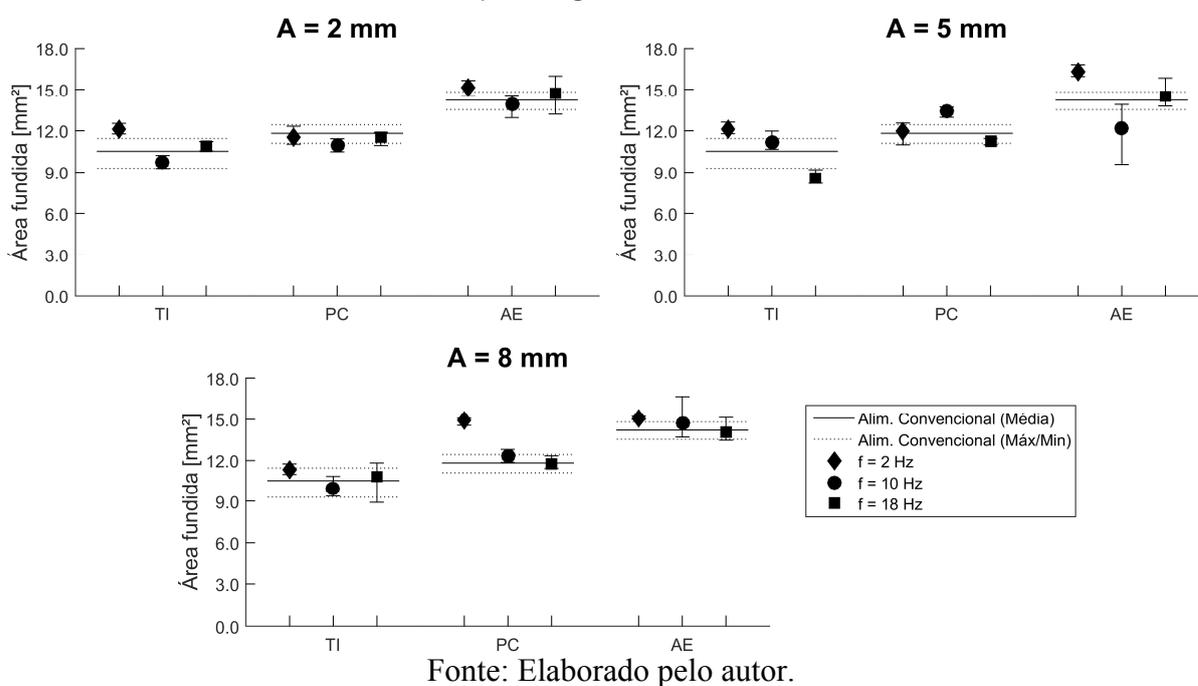
5.2.4.5 Efeito da oscilação longitudinal do arame na área fundida

Na Figura 67 são apresentados os gráficos de área fundida dos cordões em função da condição operacional, da frequência e amplitude de oscilação do material de adição.

Analisando a Figura 67 percebe-se que a área fundida varia apenas em função da condição operacional, e não pela utilização da oscilação longitudinal do arame ou da variação dos seus parâmetros. Como já discutido, verifica-se que a oscilação longitudinal de material tem a capacidade de causar variações em características geométricas da ZF como penetração,

reforço e largura isoladamente, mas quando se considera a área fundida, que se apresenta como uma característica cuja magnitude é influenciada diretamente por estas três mencionadas, a soma dos efeitos tende a ser nula.

Figura 67 – Área fundida em função da condição operacional, frequência e amplitude de oscilação longitudinal do arame.



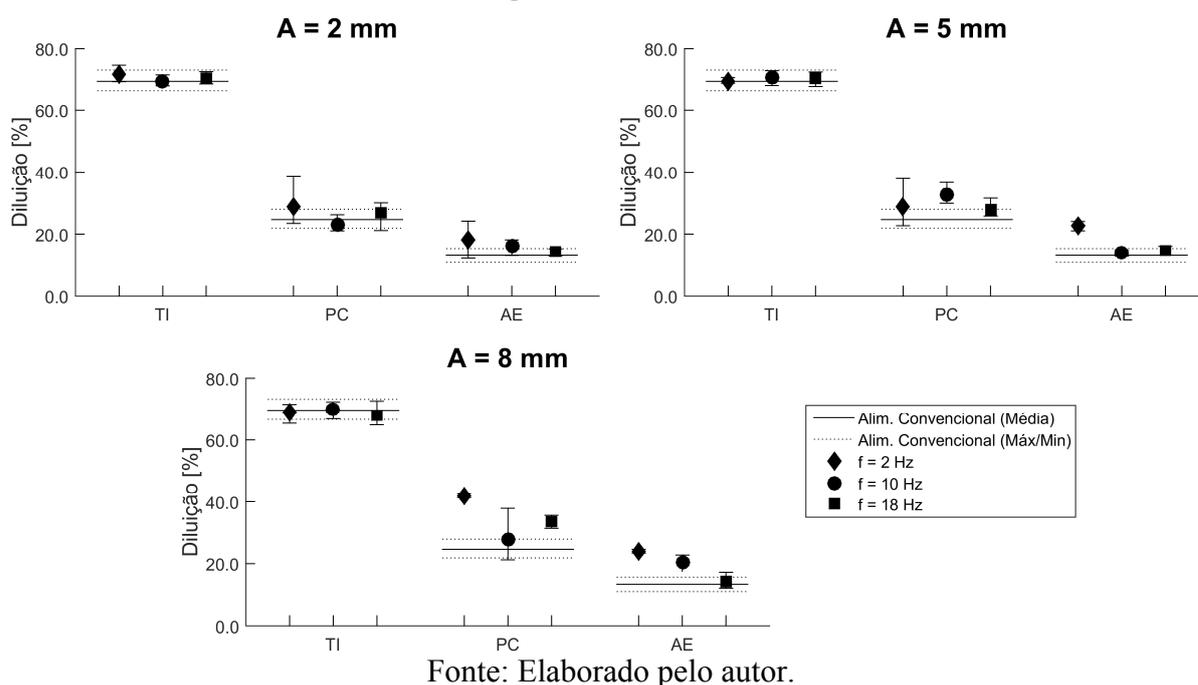
Entende-se que a oscilação longitudinal do arame não tem condições de interferir no aporte de energia do processo que teria, juntamente com a quantidade de material depositado, papel preponderante em alterações na magnitude da área fundida. Como os parâmetros de tensão média do arco, corrente média de soldagem e velocidade de soldagem foram aproximadamente constantes em todos os ensaios, o único caminho que a oscilação longitudinal do arame teria para influenciar na energia de soldagem seria pela atuação na eficiência térmica do processo, o que parece não acontecer, já que como mencionado não se observa efeito da oscilação longitudinal na área fundida.

5.2.4.6 Efeito da oscilação longitudinal do arame na diluição

A diluição é diretamente proporcional a área fundida do material de base, e inversamente proporcional a soma da área fundida do material de base e a área de reforço, sendo que essa soma representa a área fundida. Como foi verificado no tópico anterior, a oscilação

longitudinal do arame não apresenta influência expressiva na área fundida dos cordões. Assim, entende-se que variações decorrentes do emprego da oscilação longitudinal do arame na diluição dos cordões de solda estão diretamente associadas a variações na área fundida do material de base. A Figura 68 apresenta os gráficos da diluição dos cordões em função da condição operacional, da frequência e amplitude de oscilação do material de adição.

Figura 68 – Diluição em função da condição operacional, frequência e amplitude de oscilação longitudinal do arame.



No que se refere à condição operacional de transferência intermitente, não se observa influência significativa da oscilação longitudinal do arame da diluição dos cordões. Tendo em vista que a diluição está diretamente associada à área fundida do material de base e que essa sofre grande influência da penetração e da largura dos cordões, é natural que não sejam observadas variações para essa condição operacional. No caso da transferência intermitente, observou-se uma diminuição da penetração e um aumento da largura com a oscilação longitudinal do arame, sendo que a diminuição da penetração tende a diminuir a área fundida do material de base e o aumento da largura tende a aumentá-la. Dessa forma, percebe-se que a soma dos efeitos resultou na ausência de variações na diluição.

No caso da condição operacional de arame enterrado, ambas a penetração e a largura apresentaram um aumento com a oscilação longitudinal do arame, o que resulta no aumento da área fundida do material de base, e, conseqüentemente da diluição (até 85%, no ensaio AE28). O aumento da diluição da Figura 68 possui maior expressão para a maior amplitude de

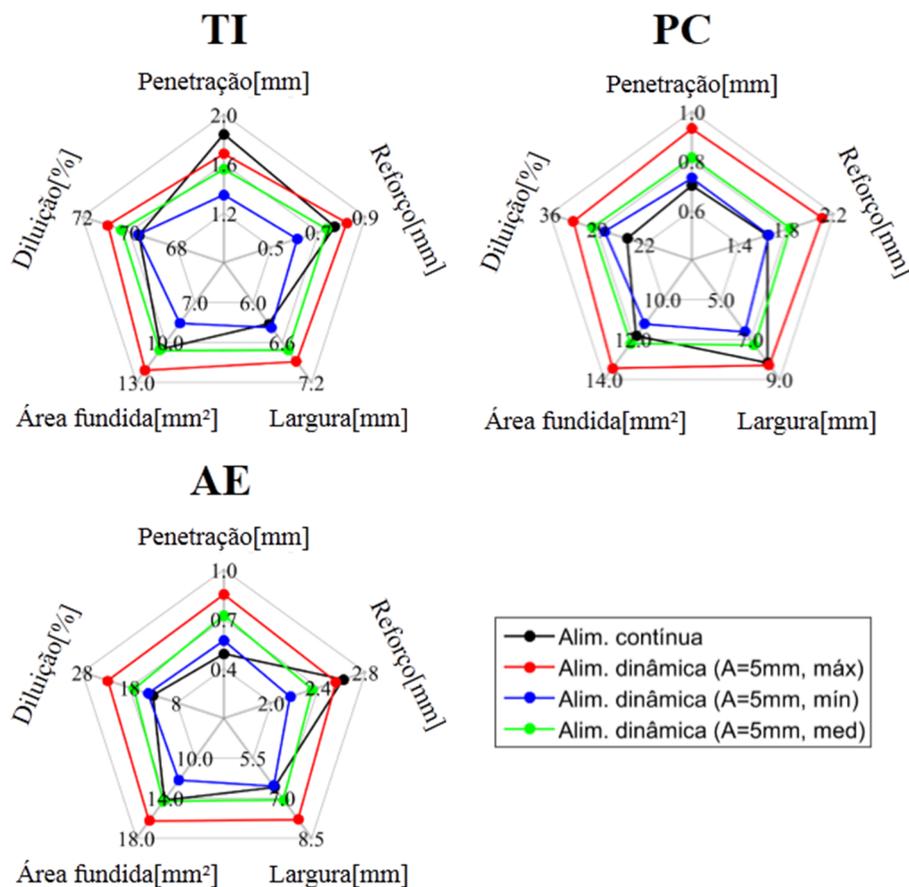
oscilação, o que também acontece com a penetração para a condição operacional de arame enterrado.

A análise dos resultados de penetração e largura para a condição de ponte contínua mostram um aumento da penetração (principalmente para as amplitudes de 5 e 8 mm) e uma queda expressiva na largura dos cordões com a utilização da oscilação longitudinal. Nesse sentido, como ocorreu uma queda expressiva da largura, e, ainda, considerando que a largura do cordão possui um maior impacto em termos de variação da área fundida do material de base, já que de maneira geral possui uma magnitude maior do que a penetração esperava-se uma queda na diluição. No entanto, a oscilação longitudinal impôs um aumento da diluição para essa condição operacional, principalmente para as duas maiores amplitudes de oscilação empregadas. Tal fato está intimamente ligado a mudança na morfologia dos cordões já reportada. Como a amostra de referência possui uma extensa região central com penetração rasa, sua área fundida do material de base acaba sendo significativamente menor do que a mesma área para os cordões produzidos com oscilação longitudinal e, portanto, menor é a sua diluição. Dessa forma, observa-se um aumento da diluição para a condição operacional de ponte contínua com o emprego da oscilação longitudinal na comparação com a sua amostra de referência (até 71%, no ensaio PC28).

5.2.4.7 Síntese do efeito da oscilação longitudinal do arame nas características geométricas da Zona Fundida

Até então, foram discutidos os efeitos da oscilação longitudinal do arame nas características geométricas da ZF de maneira isolada. Propõe-se agora a disposição de resultados em gráficos polares, que permitem a apresentação integrada dos efeitos sobre a penetração, reforço, largura, área fundida e diluição. Na Figura 69 são apresentados três gráficos polares, um para cada condição operacional estudada, sendo que em cada gráfico são plotadas quatro curvas. A primeira curva representa as características geométricas da amostra de referência. As outras três curvas representam os valores máximos, mínimos e médios das amostras obtidas com oscilação longitudinal do arame e amplitude de oscilação de 5 mm. A escolha da amplitude de oscilação em questão se deu em função da sua posição de meio de escala quando se observa o intervalo de amplitudes de oscilação estudadas. Além disso, quando a variação da amplitude de oscilação demonstra efeito sobre as características geométricas da ZF dos cordões de solda, entende-se que os resultados obtidos para a amplitude de 5 mm tendem a se apresentar como intermediários na comparação com as demais.

Figura 69 – Representação polar do efeito da oscilação longitudinal do arame nas características geométricas da ZF.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na condição operacional de transferência intermitente fica evidente a queda expressiva na penetração com a oscilação longitudinal do arame. Além disso, percebe-se também um aumento na largura. Para as demais características geométricas da ZF dos cordões de solda, o que se observa para essa condição operacional é que a referência se apresenta em posição muito próxima dos marcadores respectivos aos valores médios obtidos com a oscilação longitudinal. Dessa forma, reitera-se a invariância das demais características geométricas com a oscilação longitudinal do arame para essa condição operacional.

Quando se analisa o gráfico polar da condição operacional de ponte contínua, percebe-se um sensível aumento da penetração e da diluição com a utilização da oscilação longitudinal do arame. Com relação ao reforço dos cordões, percebe-se a tendência de aumento com a oscilação longitudinal do arame, pois apesar do marcador respectivo a amostra de referência estar muito próximo do valor mínimo obtido com oscilação longitudinal, ambos estão posicionados mais próximos da origem quando se compara com o marcador de valor médio.

No que se refere a largura dos cordões, quando se compara a referência com o marcador da curva média, verifica-se a tendência de queda na largura. Não são observados efeitos da oscilação longitudinal do arame na área fundida para a condição operacional de ponte contínua, como reitera o gráfico polar pela sobreposição da amostra de referência com o marcador da curva média.

Já para a condição operacional de arame enterrado, um aumento considerável na penetração é evidenciado nos gráficos polares ao se introduzir a oscilação longitudinal do arame. Um sensível aumento da diluição também pode ser percebido. No que se refere ao reforço e a largura, mais uma vez recorre-se a curva de valores médios obtidos com a oscilação longitudinal do arame para uma discussão justa. Na comparação com os marcadores da curva média, evidencia-se uma diminuição no reforço e um aumento da largura quando aplica-se a oscilação longitudinal na condição operacional de arame enterrado, o oposto do que é verificado para a condição de ponte contínua. Novamente, não se percebe efeito da oscilação longitudinal na área fundida.

Portanto, fica claro que os efeitos da oscilação longitudinal do arame sobre os aspectos geométricos da ZF estão intimamente ligados a condição operacional empregada, sendo tal fato majoritariamente responsável pela grande gama de resultados (muitas vezes divergentes) que são encontrados na literatura quando se aborda esse assunto. Assim a escolha da condição operacional que será utilizada, bem como a devida parametrização dos processos de soldagem são determinantes para com a obtenção de resultados desejados quando da aplicação da oscilação longitudinal do arame no processo de soldagem TIG. Além disso, embora empregando a mesma condição operacional, a utilização de tecnologias que possuem particularidades no que se refere a promoção da oscilação longitudinal do arame também podem levar a resultados díspares.

5.2.5 Avaliação metalúrgica da zona de fusão

A avaliação metalúrgica da zona de fusão realizada no presente trabalho compreende a análise morfológica e de tamanho dos grãos associados à microestrutura em questão.

5.2.5.1 Efeito da condição operacional

Como visto, a alteração da condição operacional, associada à quantidade de material depositado na poça de fusão tende a apresentar significativa influência nos resultados relativos

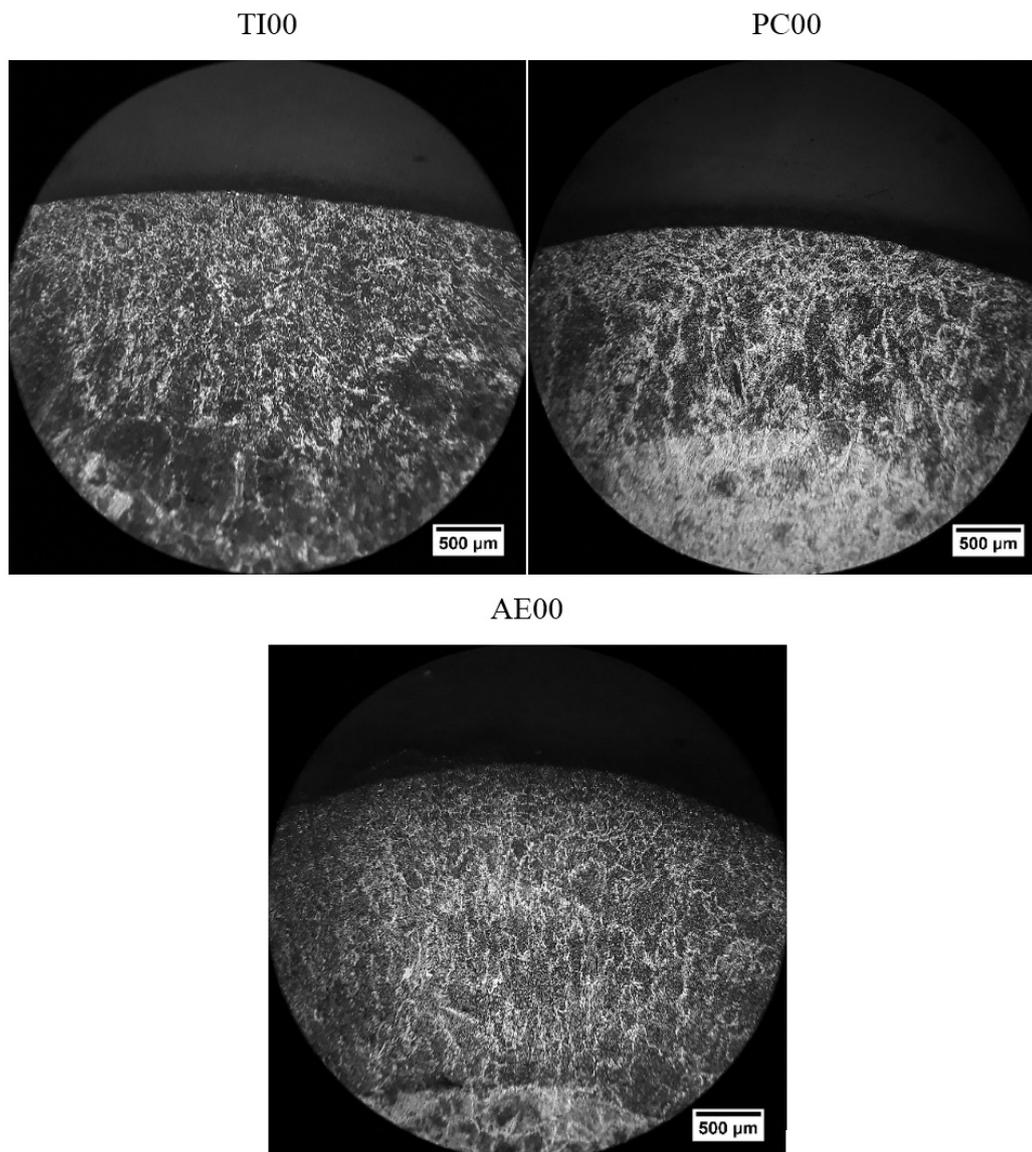
à morfologia dos cordões de solda. Tal tendência não foi mitigada no que se refere à metalurgia da zona de fusão. A Figura 70 apresenta as micrografias do centro da zona de fusão (região 1) das amostras de referência, em todas as condições operacionais adotadas no estudo.

Em todas as condições operacionais, quando se observa a evolução da morfologia dos grãos partindo do centro da zona de fusão em direção a face, grãos cristalinos com orientação aleatória parecem ser percebidos mais próximos a face, essa região é denominada de zona coquilhada. A hipótese levantada é que a região da face do cordão tem uma perda de calor potencializada em função do contato direto da superfície com o ambiente. Assim, uma alta taxa de nucleação é percebida nessa região em função da elevada taxa de resfriamento. Tal fenômeno também é responsável por mitigar o crescimento dos grãos durante a solidificação da poça de fusão.

No centro da ZF, a condição operacional de transferência intermitente apresenta, em comparação com as outras condições, uma microestrutura mais refinada com grãos equiaxiais. Dessa forma, não existe variação morfológica dos grãos em direção a face do cordão, apesar de ser percebida qualitativamente uma pequena diminuição no tamanho dos grãos nessa direção.

Em ambas as condições operacionais de ponte contínua e arame enterrado, o centro da ZF apresenta uma microestrutura grosseira com grãos colunares. A nucleação destes grãos acontece na região coquilhada com crescimento em direções cristalográficas favoráveis para a extração do calor. O crescimento destes grãos também é responsável pela restrição do crescimento dos grãos da região coquilhada.

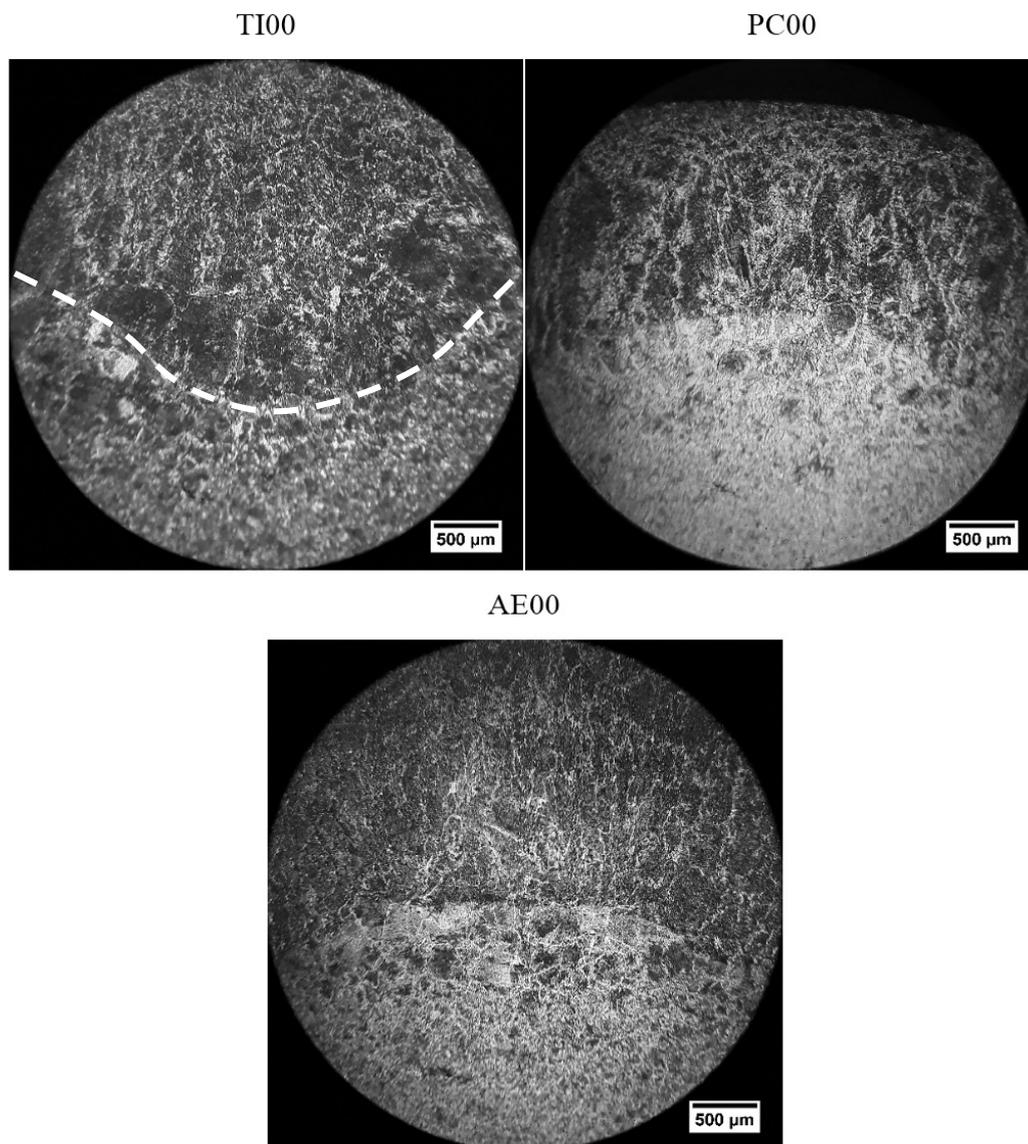
Figura 70 – Micrografias da região central da ZF (ampliação de 40x) das amostras obtidas na condição de referência.



Fonte: Elaborado pelo autor.

No que se refere à região da raiz dos cordões (Figura 71), acompanhando a sua linha de fusão, a condição operacional de transferência intermitente apresenta uma faixa com extensão aproximada de $\frac{1}{4}$ da altura do cordão com grãos grosseiros. Nessa região os grãos apresentam morfologia equiaxial. A evolução da microestrutura a partir da raiz em direção ao centro da ZF apresenta uma diminuição no tamanho dos grãos significativamente mais expressiva do que aquela observada na evolução do centro da ZF em direção da face. Na condição operacional de ponte contínua, a região da raiz do cordão apresenta uma microestrutura majoritária de grãos colunares, sendo que na condição de arame enterrado pode-se perceber uma microestrutura composta tanto por grãos colunares quanto por grãos equiaxiais.

Figura 71 – Micrografias da região da raiz da ZF (ampliação de 40x) das amostras obtidas na condição de referência.



Fonte: Elaborado pelo autor.

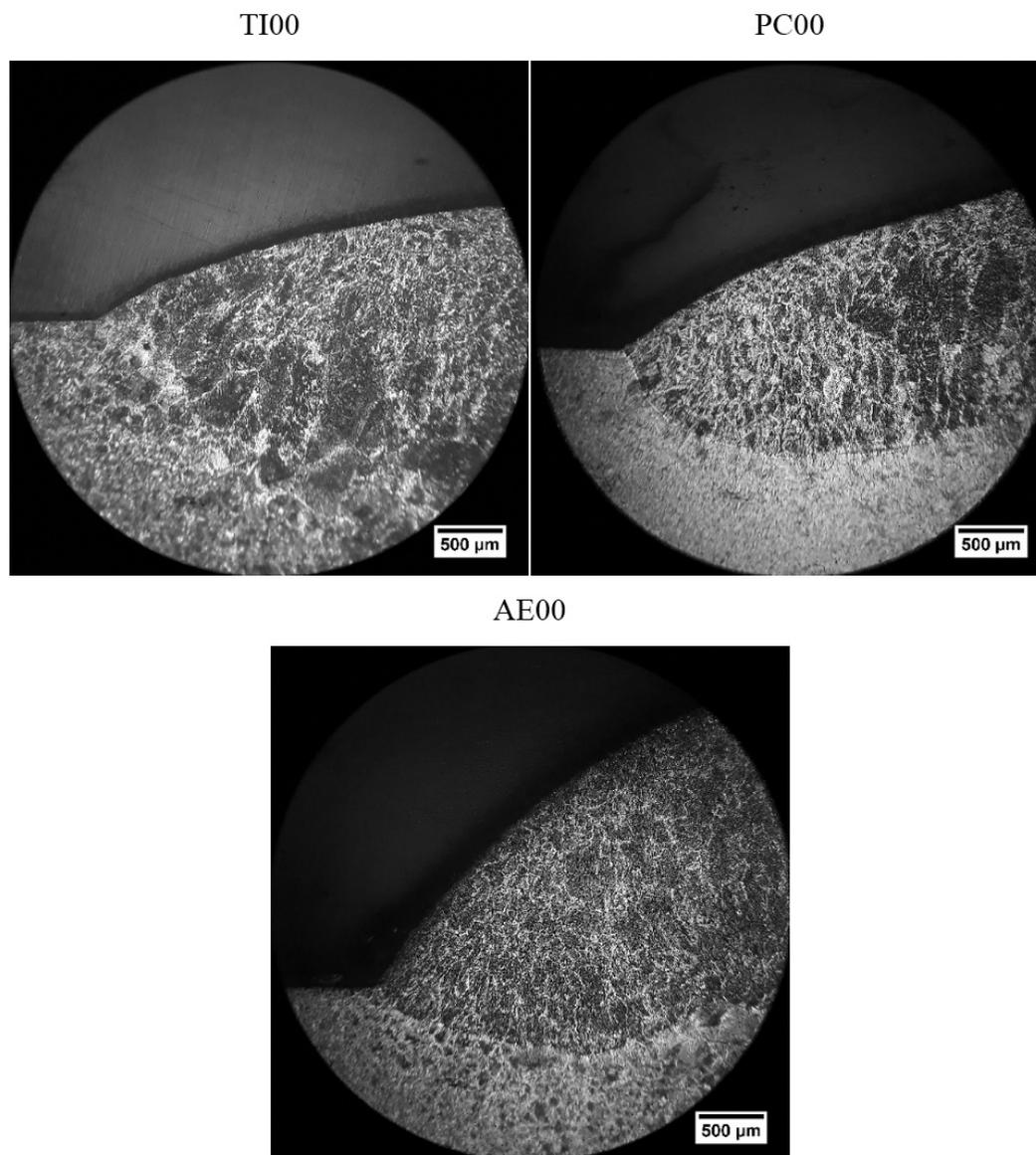
No caso da condição de transferência intermitente, levanta-se a hipótese de que a presença de grãos grosseiros na região da raiz do cordão, em comparação aos grãos do centro da ZF e da região mais próxima à face esteja associada à transferência do calor da poça. Com base no estudo de Limmaneevichitr e Kou [40], nessa condição operacional estima-se que a condução de calor pelo material de base seja o mecanismo de extração de calor da zona de fusão predominante. Dessa forma, como uma maior quantidade de calor é levada para a raiz do cordão, infere-se que maior tende a ser o seu tempo de resfriamento, permitindo que os grãos se apresentem com maior crescimento nessa região.

Ainda, a microestrutura com grãos mais grosseiros percebida para as condições operacionais de arame enterrado e ponte contínua (principalmente no centro da ZF) está associada à maior quantidade de material depositado nessas condições, em comparação a transferência intermitente. Como a quantidade de material é significativamente maior, maior se torna o seu tempo de resfriamento, de maneira que os grãos dispõem de mais tempo para crescerem. Embora nessas duas condições o arame esteja roubando calor da poça de fusão, o que tenderia a causar um resfriamento mais rápido da poça, resultando em microestrutura mais refinada, acredita-se que as expressivas diferenças nas quantidades de material depositadas entre as condições operacionais teria mascarado tal efeito.

Na Figura 72 são apresentadas as micrografias das amostras de referência obtidas nas regiões da margem esquerda dos cordões. A condição operacional de transferência intermitente mantém a presença da faixa de grãos grosseiros acima de linha de fusão. Já as condições operacionais de ponte contínua e arame enterrado apresentam uma microestrutura com morfologia composta majoritariamente por grãos equiaxiais, apresentando ainda grãos colunares.

A hipótese levantada para justificar a presença de grãos com menor dimensão na região da margem quando comparados com a região da raiz e centro da ZF, no caso das condições operacionais de arame enterrado e ponte contínua também se associa a quantidade de material presente nessas regiões. Como na região da margem, principalmente para o caso da ponte contínua, a altura do cordão é relativamente menor do que na região central da largura do cordão, possuindo, portanto, menor volume local, infere-se um resfriamento local do material mais rápido, dando origem à morfologia percebida.

Figura 72 – Micrografias da região da margem do cordão (ampliação de 40x) das amostras obtidas na condição de referência.

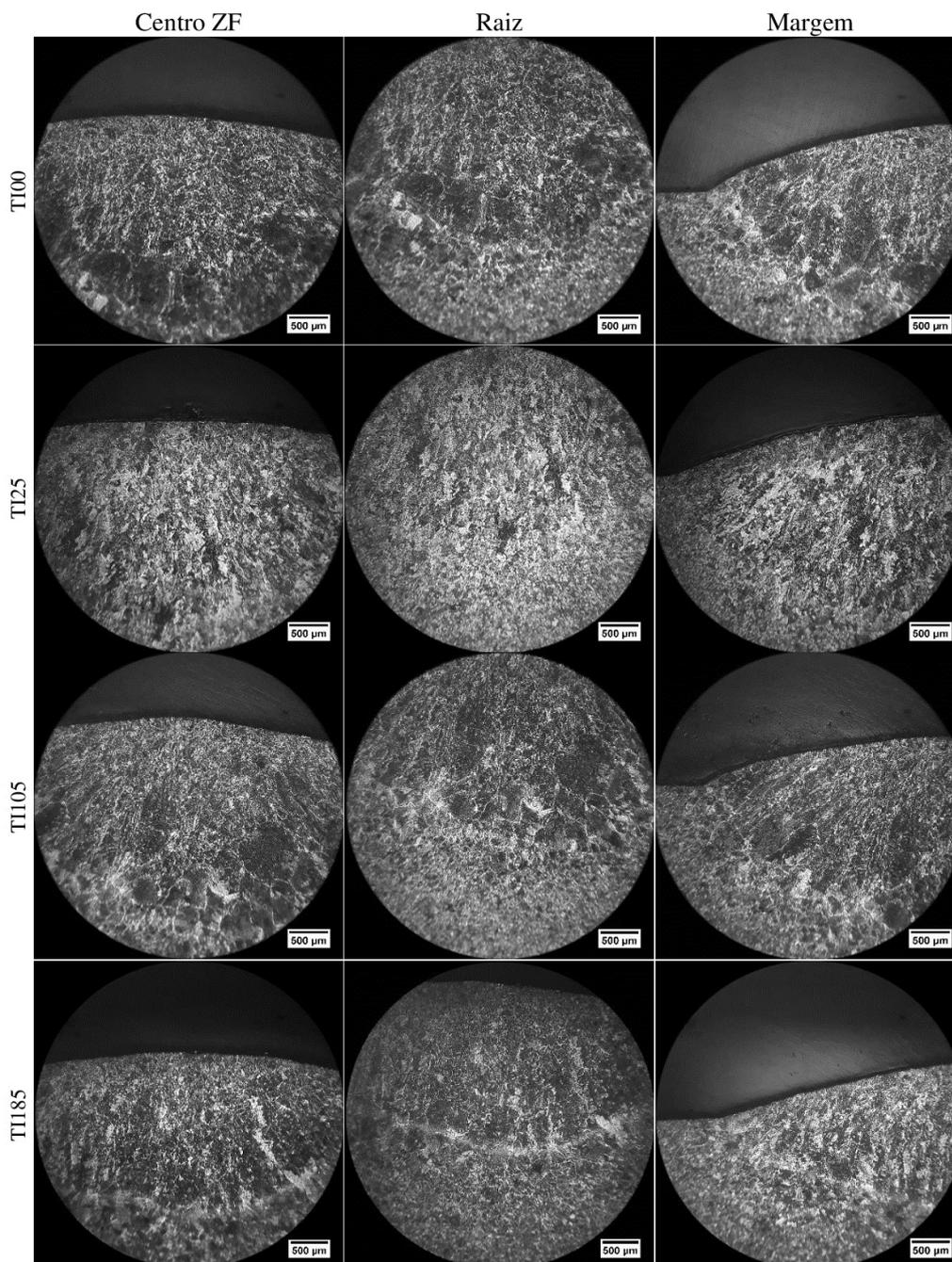


Fonte: Elaborado pelo autor.

5.2.5.2 Efeito do emprego da oscilação longitudinal do arame

Discute-se nesse tópico o efeito da oscilação longitudinal do arame em aspectos metalúrgicos da zona de fusão. Para tal, são apresentadas para cada condição operacional as micrografias associadas à amplitude de oscilação de 5 mm, que é a amplitude de meio de escala quando se observa o intervalo de amplitudes de oscilação estudadas. Ademais, no Apêndice E são apresentadas todas as micrografias obtidas no estudo. Na Figura 73 são apresentadas as micrografias das amostras obtidas com a oscilação longitudinal do arame na condição operacional de transferência intermitente.

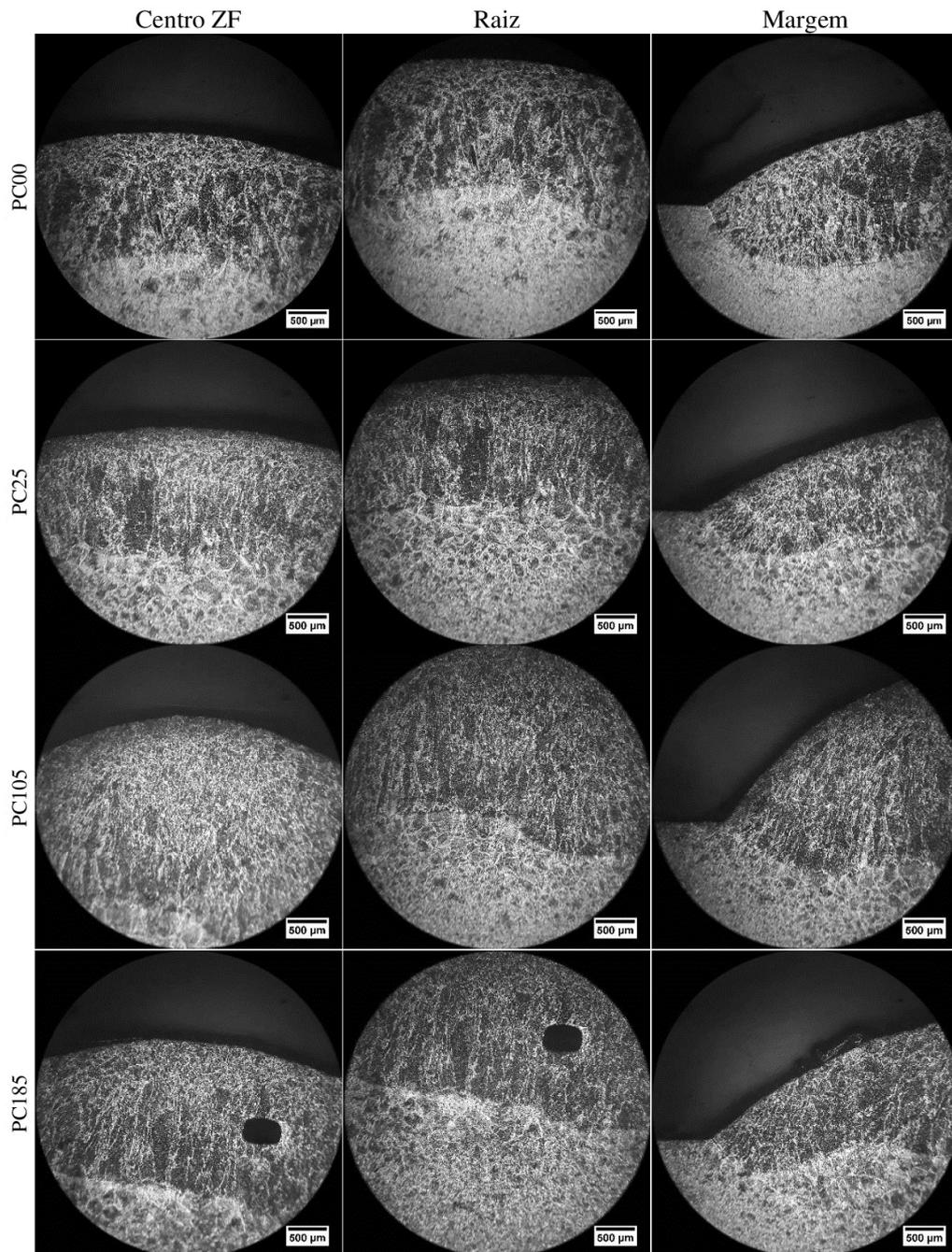
Figura 73 – Micrografias das amostras obtidas na condição operacional de transferência intermitente (amplitude de oscilação de 5 mm e referência).



Fonte: Elaborado pelo autor.

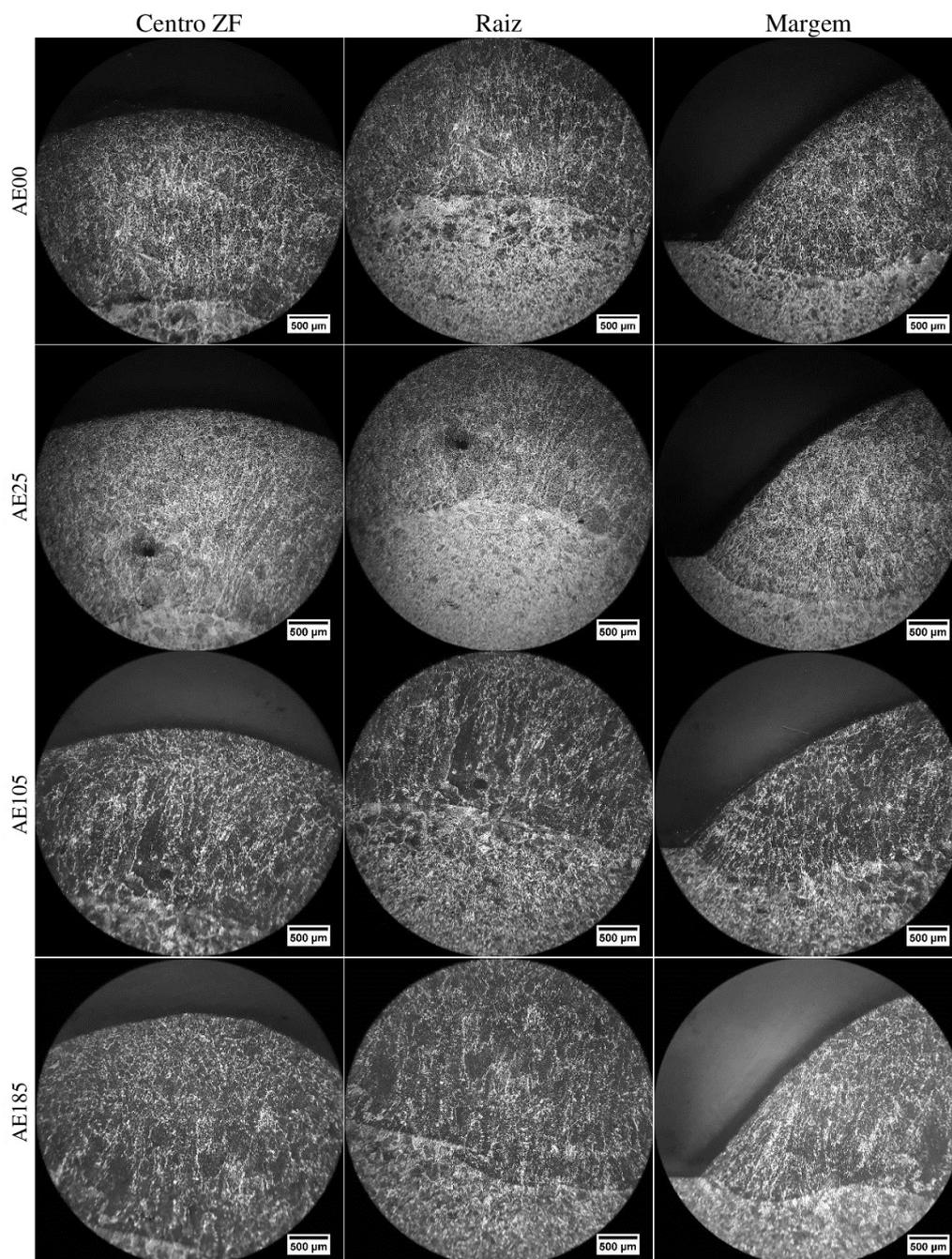
De fato, por meio da comparação entre as micrografias apresentadas na Figura 73, não são percebidas alterações metalúrgicas explícitas em função do emprego da oscilação longitudinal do arame. A observação das micrografias apresentadas no Apêndice E, para as outras amplitudes de oscilação do arame corroboram com tal verificação. Na Figura 74 e Figura 75 são apresentadas, respectivamente, as micrografias das amostras obtidas com oscilação longitudinal do arame nas condições operacionais de ponte contínua e arame enterrado.

Figura 74 – Micrografias das amostras obtidas na condição operacional de ponte contínua (amplitude de oscilação de 5 mm e referência).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 75 – Micrografias das amostras obtidas na condição operacional de arame enterrado (amplitude de oscilação de 5 mm e referência).



Fonte: Elaborado pelo autor.

No que se refere às condições operacionais de arame enterrado e ponte contínua, a inobservância de efeito da oscilação longitudinal do arame sobre aspectos metalúrgicos da zona de fusão se repete. Tal fato é evidenciado pela análise da Figura 74 e Figura 75 e corroborado pelas demais micrografias apresentadas no Apêndice E.

Desta forma, no que se refere ao emprego da oscilação longitudinal do arame no processo de soldagem TIG, cogita-se que o motivo pelo qual a literatura praticamente não

apresentar estudos associados a análises metalúrgicas e microestruturais é devido os efeitos não serem significativos.

6 CONCLUSÕES

Com a realização do presente trabalho e análise dos resultados obtidos, conclui-se:

- O dispositivo concebido no LTS é capaz de promover a oscilação longitudinal do arame permitindo que essa forma de alimentação de material seja aplicada ao processo de soldagem TIG;
- O deslocamento da ponta do arame imprimido pelo dispositivo concebido reflete de maneira adequada os parâmetros regulados na IHM, refletindo o seu bom desempenho operacional;
- A oscilação longitudinal do arame não influencia de maneira significativa na estabilidade do processo de soldagem TIG;
- Nas condições empregadas neste trabalho, a oscilação longitudinal do arame causou, no arame enterrado e ponte contínua, o surgimento de poros na zona de fusão;
- A condição operacional de alimentação do arame por si só resulta em alterações significativas na morfologia dos cordões de solda;
- A oscilação longitudinal do arame resultou em uma tendência de queda na penetração dos cordões, que foi mais expressiva para maiores frequências e amplitudes de oscilação, além de um sensível aumento na largura, na condição operacional de transferência intermitente;
- Na condição operacional de arame enterrado, tendências de aumento na penetração, largura e diluição, além de diminuição do reforço foram obtidas com a oscilação longitudinal do arame;
- A oscilação longitudinal do arame resultou na tendência de aumento da penetração para maiores amplitudes de oscilação, além da tendência de aumento do reforço e da diluição, bem como a diminuição da largura, na condição operacional de ponte contínua;
- A oscilação longitudinal do arame não proporcionou alterações metalúrgicas expressivas na ZF;
- A condição operacional adotada, em associação à tecnologia adotada para a promoção da oscilação longitudinal do arame tem influência direta nos resultados obtidos no processo de soldagem TIG.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com a realização do presente trabalho, o LTS acompanha o atual estágio de desenvolvimento relacionado ao estado da arte no que diz respeito à oscilação longitudinal do arame no processo de soldagem TIG. Ainda, o dispositivo concebido permitirá não só a realização deste, mas de trabalhos futuros, contribuindo, assim, para o desenvolvimento científico e tecnológico.

Nesse contexto, considerando a expressiva influência que a condição operacional apresentou sobre os resultados do atual trabalho, principalmente no que se refere à morfologia dos cordões de solda, propõe-se:

- Replicar os ensaios realizados na condição de simples deposição sobre chapa agora em juntas soldadas, com o objetivo de investigar a manutenção das tendências observadas;
- Desenvolver estudos mais aprofundados visando investigar os mecanismos que levam ao surgimento de porosidades na ZF com a aplicação da oscilação longitudinal do arame;
- A aplicação do modo de operação controlado do dispositivo concebido em ensaios de soldagem. Espera-se que a aplicação do modo de operação controlado permita que as condições operacionais de transferência de material para a poça de fusão sejam menos dependentes da quantidade de material depositada;
- Como alternativa, sugere-se a mudança da condição operacional através da mudança no posicionamento do arame alimentado e/ou do par corrente de soldagem e velocidade de soldagem, de maneira a manter a velocidade de alimentação do arame constante, permitindo observar mais isoladamente o efeito da variação da condição operacional – ao manter uma quantidade de material depositada aproximadamente constante entre as condições;
- A sincronização da oscilação longitudinal do arame com a corrente pulsada no processo de soldagem TIG;
- A alimentação do arame por trás ou pelos lados do arco voltaico;
- Associar a técnica de oscilação longitudinal do arame com outras técnicas como o *hot-wire* e/ou alimentação tangencial;
- Avaliação da viabilidade de aplicação da técnica de oscilação longitudinal do arame em velocidades de soldagem mais elevadas em relação a condição de alimentação contínua do arame, com o objetivo de verificar o aumento de produtividade reportado por Plasch [33] e Wilson [31];
- A aplicação da oscilação longitudinal do arame em outros materiais e em juntas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] SILVA, R. H. G.; PAES, L. E. S.; SOUSA, G. L. Design of a wire measurement system for dynamic feeding TIG welding using instantaneous angular speed. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 101, n. 5-8, 2019. 1651-1660.
- [2] SCHWEDERSKY, M. B. **Estudo e desenvolvimento do processo TIG duplo eletrodo**. 2015. 192 p. Tese (Doutorado) – Programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2015.
- [3] SCHWEDERSKY, M. B. et al. High productivity TIG welding: influence of shielding gases on the limit speed for defect formation. **Soldagem & Inspeção**, 16, n. 4, 2011. 333-340.
- [4] SCHWEDERSKY, M. B. et al. Switch back technique enhances the productivity of the TIG welding process. **Welding in the world**, 61, n. 5, 2017. 971-977.
- [5] RIFFEL, K. C. et al. Effect of Dynamic Wire in the GTAW Process: Microstructure and Corrosion Resistance. **Journal of Materials Processing Technology**, 285, n. 1, 2020. 1-26.
- [6] SILVA, R. H. G. et al. TIG welding process with dynamic feeding: a characterization approach. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 96, n. 9-12, 2018. 4467-4475.
- [7] JORGE, V. L. et al. Desenvolvimento e Avaliação de Técnicas para Pulsação da Alimentação de Arame em Soldagem a Arco. **Soldagem & Inspeção**, 23, n. 3, 2018. 326-339.
- [8] JUNIOR, V. R. **Sistema de alimentação oscilatória do arame para o aumento do desempenho dos processos de soldagem à arco**. 2019. 61 p. TCC (Graduação) – Curso de Engenharia Mecatrônica, Departamento Acadêmico de Metal Mecânica, Instituto Federal de Ciência e Tecnologia de Santa Catarina. Florianópolis, 2019.
- [9] VOLKERT, S. **Proposta de uma transmissão diferencial de velocidades para alimentação oscilatória do material de adição na soldagem**. 2019. 59 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de pós-graduação em Mecatrônica, Instituto Federal de Ciência e Tecnologia de Santa Catarina. Florianópolis, 2019.
- [10] LABORATÓRIO DE TECNOLOGIA DA SOLDAGEM (LTS). **Relatório técnico: estudo e desenvolvimento exploratório de tecnologia para alimentação dinâmica de arame no processo GTAW**. Universidade Federal de Santa Catarina. Joinville. 2018.

- [11] ALMQVIST, E. History of Industrial Gases. **New York: Springer Science & Business Media**, 2003.
- [12] LUCAS, W. **TIG and plasma welding: process techniques, recommended practices and applications**. Cambridge: Abington Publishing, 2011.
- [13] LU, S. P.; QUIN, M. P.; DONG, W. C. Highly efficient TIG welding of Cr13Ni5Mo martensitic stainless steel. **Journal of Materials Processing Technology**, 213, n. 2, 2013. 229-237.
- [14] MIG WELDING - THE DIY GUIDE. **TIG Welding Tutorial - Fillet Welds**. Disponível em: <<https://www.mig-welding.co.uk/tig-fillet-weld.htm>>. Acesso em: 27 Novembro 2019.
- [15] SAVAGE, W. F.; NIPPES, N. F.; AGUSA, K. Effect of Arc Force on Defect Formation in GTA Welding. **Welding Journal**, 58, n. 7, 1979. 212-224.
- [16] KUMAR, A.; DEBROY, T. Toward a unified model to prevent humping defects in gas tungsten arc welding. **Welding journal**, 85, n. 12, 2006. 292-304.
- [17] CHEN, S. J. et al. Droplet transfer in arcing-wire GTAW. **Journal of Manufacturing Processes**, 23, n. 1, 2016. 149-156.
- [18] BURCA, M.; LUCACIU, I.; MAGDA, A. Technological Issues in Mechanised Feed WIG/TIG Welding Surfacing of Welding. **Annals of the Oradea University. Fascicle of Management and Technological Engineering**, 2, n. 2, 2016. 151-154.
- [19] YUDODIBROTO, B. Y. B. et al. Influence of filler wire addition on weld pool oscillation during gas tungsten arc welding. **Science and Technology of Welding and Joining**, 9, n. 2, 2004. 163-168.
- [20] GENG, H. et al. Optimization of wire feed for GTAW based additive manufacturing. **Journal of Materials Processing Technology**, 243, n. 1, 2017. 40-47.
- [21] HONMA, S.; YASUDA, K. Study of semi-automatic TIG welding. **Welding International**, 18, n. 6, 2004. 450-455.
- [22] PAES, L. E. S. **Soldagem TIG orbital: técnica de alimentação dinâmica do arame visando aumento na produtividade**. 2016. 206 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2016.
- [23] DELGADO, L. C. **Estudo e desenvolvimento do processo TIG com alimentação automática de arame**. 2000. 82 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2000.

- [24] SELVI, S.; RAJASEKAR, E.; VISHVAKSENAN, A. Cold metal transfer (CMT) technology-An overview. **Defence technology**, 14, n. 1, 2018. 28-44.
- [25] ZHANG, H. T. et al. The arc characteristics and metal transfer behaviour of cold metal transfer and its use in joining aluminium to zinc-coated steel. **Materials Science and Engineering: A**, 499, n. 1-2, 2009. 111-113.
- [26] TALALAEV, R. et al. Cold metal transfer (CMT) welding of thin sheet metal products. **Estonian Journal of Engineering**, 18, n. 3, 2012. 243-250.
- [27] FRONIUS. **CMT: Cold Metal Transfer**. Disponível em: <<http://www.digitalweldingsolutions.com/CMT.pdf>>. Acesso em: 10 Dezembro 2019.
- [28] JORGE, V. L. et al. The effect of pulsed cold-wire feeding on the performance of spray GMAW. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 107, n. 7-8, 2020. 3485-3498.
- [29] JORGE, V. L. et al. The potential of wire feed pulsation to influence factors that govern weld penetration in GMA welding. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 110, n. 9-10, 2020. 2685-2701.
- [30] RUDY, J. F. Development and application of dabber gas tungsten arc welding for repair of aircraft engine, seal teeth. **ASME 1982 International Gas Turbine Conference and Exhibit**, 1, n. 1, 1982. 1-4.
- [31] WILSON, M. TIP TIG: new technology for welding. **Industrial Robot**, 34, n. 6, 2007. 462-466.
- [32] PIKE, G. **Evaluation of the TIP-TIG welding system, a semi-automatic hot wire GTAW process, compared to manual GTAW**. Preparado para National Shipbuilding Research Program. [S.l.], p. 26. 2013.
- [33] PLASCH, S. **TIP TIG**. Disponível em: <<http://www.tiptig.com>>. Acesso em: 17 Dezembro 2019.
- [34] MARTINS, K. **Desenvolvimento e caracterização de tecnologia para alimentação dinâmica de arame no processo GTAW**. 2018. 61 p. TCC (Graduação) – Curso de Engenharia Automotiva, Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina. Joinville, 2018.
- [35] SILWAL, B.; SANTANGELO, M. Effect of vibration and hot-wire gas tungsten arc (GTA) on the geometric shape. **Journal of Materials Processing Technology**, 251, n. 1, 2018. 138-145.

- [36] SILVA, R. H. G. et al. Contributions of the high frequency dynamic wire deeding in the GTAW process for increased robustness. **Soldagem & Inspeção**, 24, n. 8, 2019. 1-10.
- [37] RIFFEL, K. C. et al. Keyhole GTAW with dynamic wire feeding applied to orbital welding of 304L SS pipes. **Soldagem & Inspeção**, 24, n. 1, 2019. 1-11.
- [38] SILVA, R. H. G. et al. Effect of dynamic wire in the GTAW process. **Journal of Materials Processing Technology**, 269, n. 1, 2019. 91-101.
- [39] RIFFEL, K. C. **Avanços Tecnológicos do Processo TIG: Técnicas Inovadoras de Alimentação de Arame e Procedimentos Automatizados como Contribuição para a União de Tubos Internamente Cladeados**. 2018. 172 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2018.
- [40] LIMMANEEVICHITR, C.; KOU, S. Experiments to simulate effect of Marangoni convection on weld pool shape. **Welding Journal**, 1, 2000. 231s-237s.

APÊNDICE A – Resumo dos efeitos da oscilação longitudinal do arame na soldagem

TIG

Autor	Material e procedimento	Variáveis da oscilação longitudinal	Principais efeitos da oscilação longitudinal do arame
Rudy [30]	Reparo em motores de aeronaves: Ti6 Al-4V, Inconel 718, aço inoxidável SAE tipo 630 e a liga A286	Soldagem com e sem oscilação longitudinal do arame (frequência de oscilação: 3 - 11 Hz, amplitude de oscilação: 5 - 6 mm)	Maior uniformidade na geometria do cordão, principalmente com a utilização de pequenas correntes de soldagem (8 - 16 A)
Silwal e Santangelo [35]	Simple deposição sobre chapa de aço carbono 1018 (não relata a espessura)	Soldagem com e sem oscilação longitudinal do arame (frequência de oscilação: 16 Hz, amplitude de oscilação: não informa)	Redução no tempo de destacamento das gotas de metal fundido. Sem efeitos na penetração dos cordões de solda
Silva et al. [36]	Simple deposição sobre chapa de aço carbono SAE 1020 com espessura de 9,5 mm	Soldagem com e sem oscilação longitudinal do arame (frequência de oscilação: 18 Hz, amplitude de oscilação: não informa)	A formação e posterior destacamento das gotas de metal fundido é mais uniforme, regular e homogênea. O processo é mais robusto contra instabilidades que poderiam ser causadas por uma eventual contaminação do eletrodo no caso da alimentação contínua
Riffel et al. [37]	Soldagem de junta em "U" de tubo de aço inoxidável 304L com espessura de 12,7mm	Soldagem com e sem oscilação longitudinal do arame (frequência de oscilação: 20 Hz, amplitude de oscilação: não informa)	Processo de soldagem mais robusto, com maior reprodutibilidade e com uma transferência metálica suave. Diminuição de instabilidades da alimentação contínua
Silva et al. [6]	Simple deposição sobre chapa de aço carbono SAE 1020 com espessura de 6,35 mm	Soldagem com e sem oscilação longitudinal do arame (frequência de oscilação: 1 - 2 H, amplitude de oscilação: 3,6 - 7,2 mm)	Transferência metálica estável mesmo para relativas baixas velocidades de alimentação do arame. Maior regularidade na penetração das soldas

Silva et al. [38]	Soldagem de junta em "V" de chapas de aço carbono com 12,5 mm de espessura, com revestimento de 3mm de Inconel 625	Soldagem com e sem oscilação longitudinal do arame (frequência de oscilação: 20 Hz, amplitude de oscilação: não informa)	Maior simetria da zona de fusão quando observa-se a seção transversal dos cordões de solda. Transferência mais suave de metal para a poça de fusão, com filme fino de metal fundido
Jorge et al. [7]	Simple deposição sobre chapa de aço carbono com espessura de 3 mm	Soldagem com e sem oscilação longitudinal do arame (frequência de oscilação: 15 Hz, amplitude de oscilação: 8 mm)	Aumento na penetração e convexidade do cordão. Diminuição da largura do cordão
Volkert [9]	Simple deposição sobre chapa de aço carbono ASTM A36 com espessura de 3,75 mm	Soldagem com e sem oscilação longitudinal do arame (frequência de oscilação: 20 Hz, amplitude de oscilação: não informa)	Diminuição da penetração dos cordões
Riffel et al. [5]	Simple deposição sobre chapa de aço carbono ASTM A36 com espessura de 6,35 mm e uma camada de revestimento de Inconel 625 de 1 mm	Soldagem com e sem oscilação longitudinal do arame (frequência de oscilação: 5 - 18 Hz, amplitude de oscilação: 5 mm)	Cordões com maior reforço, menor largura e menor área fundida. Refino de grãos e melhor distribuição de precipitações com maiores frequências de oscilação. Melhora na resistência a corrosão
Laboratório de Tecnologia da Soldagem (LTS) [10]	Simple deposição sobre chapa de aço carbono SAE 1020 com espessura de 6,75 mm	Soldagem com e sem oscilação longitudinal do arame (frequência de oscilação: 1 - 20 Hz, amplitude de oscilação: 5 mm)	Leve diminuição na largura e penetração dos cordões. Diminuição da área fundida para menores velocidades de alimentação do arame. Diminuição da largura e da área fundida com o aumento da frequência de oscilação

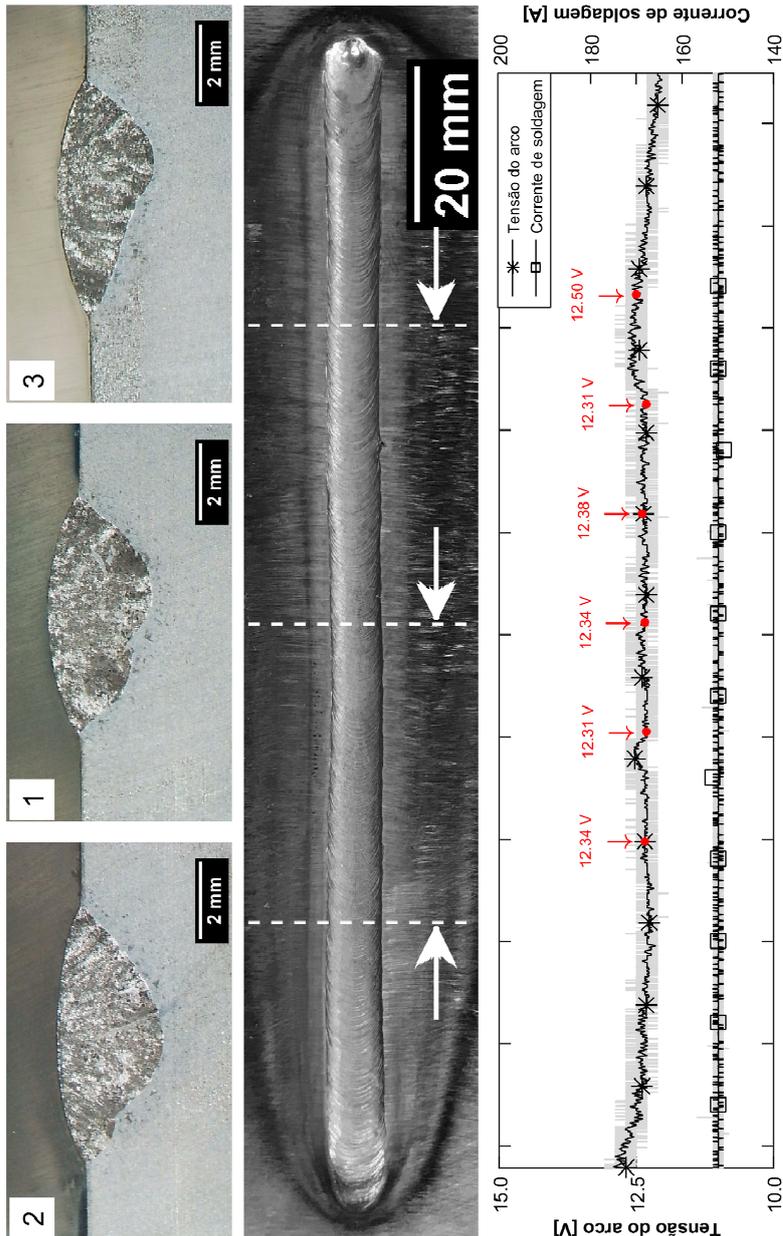
APÊNDICE B – Ficha técnica do ensaio TI00

Ficha Técnica do Ensaio

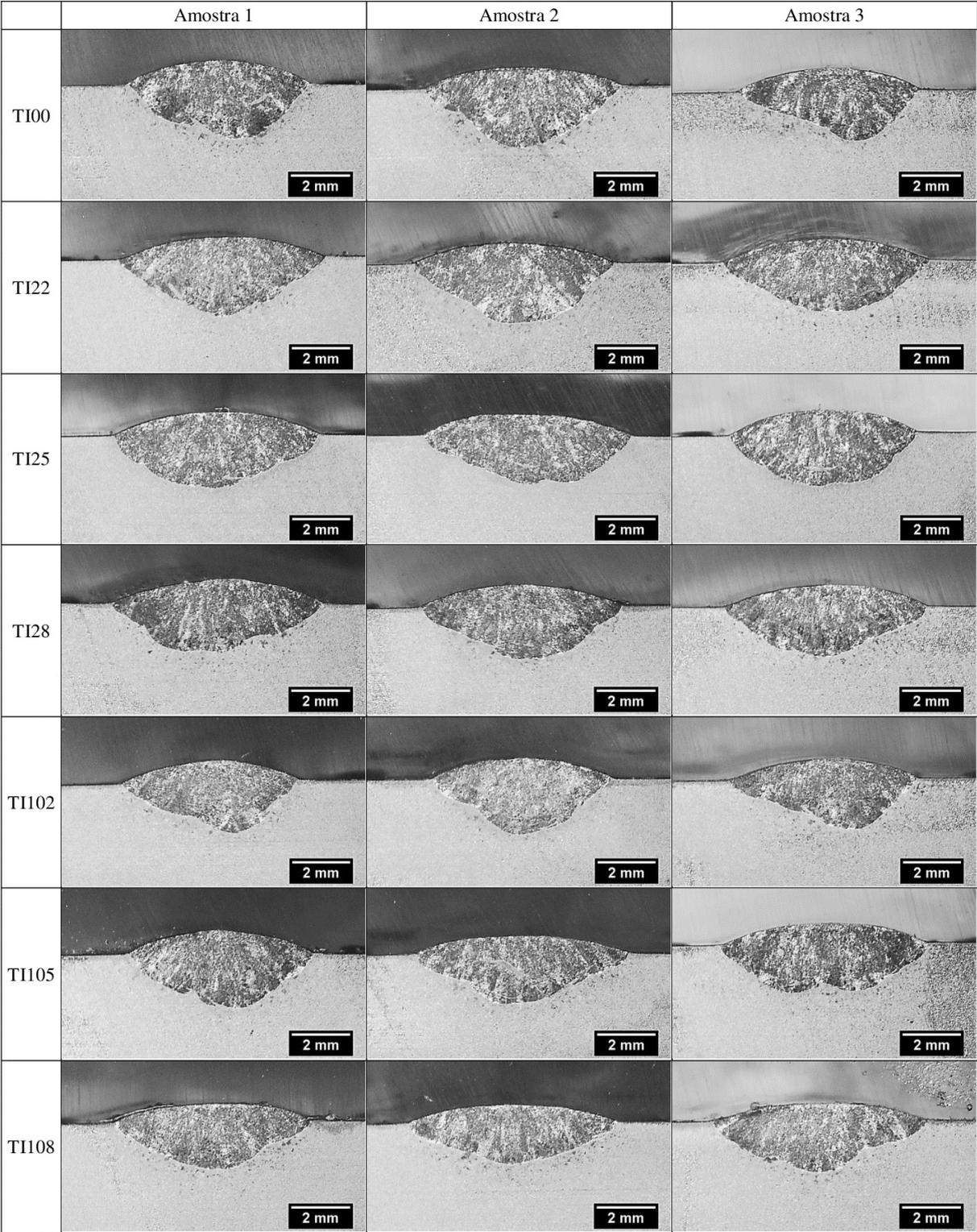
Nomenclatura do ensaio = TI00
 Tipo de alimentação de material = Contínua constante
 Frequência de oscilação = não se aplica
 Amplitude de oscilação = não se aplica
 Condição operacional = transferência intermitente
 Velocidade de alimentação do arame = 0.5 m/min
 Corrente média de soldagem = 152.10 A
 Tensão média do arco = 12.37 V
 Velocidade de soldagem = 15 cm/min
 DEP = 4 mm
 Vazão do gás de proteção = 12 L/min
 Arame de adição = AWS ER 70S-6 (Ø 1 mm)
 Eletrodo = AWS EW Th-2 (Ø 2.4 mm, afiação 30°)

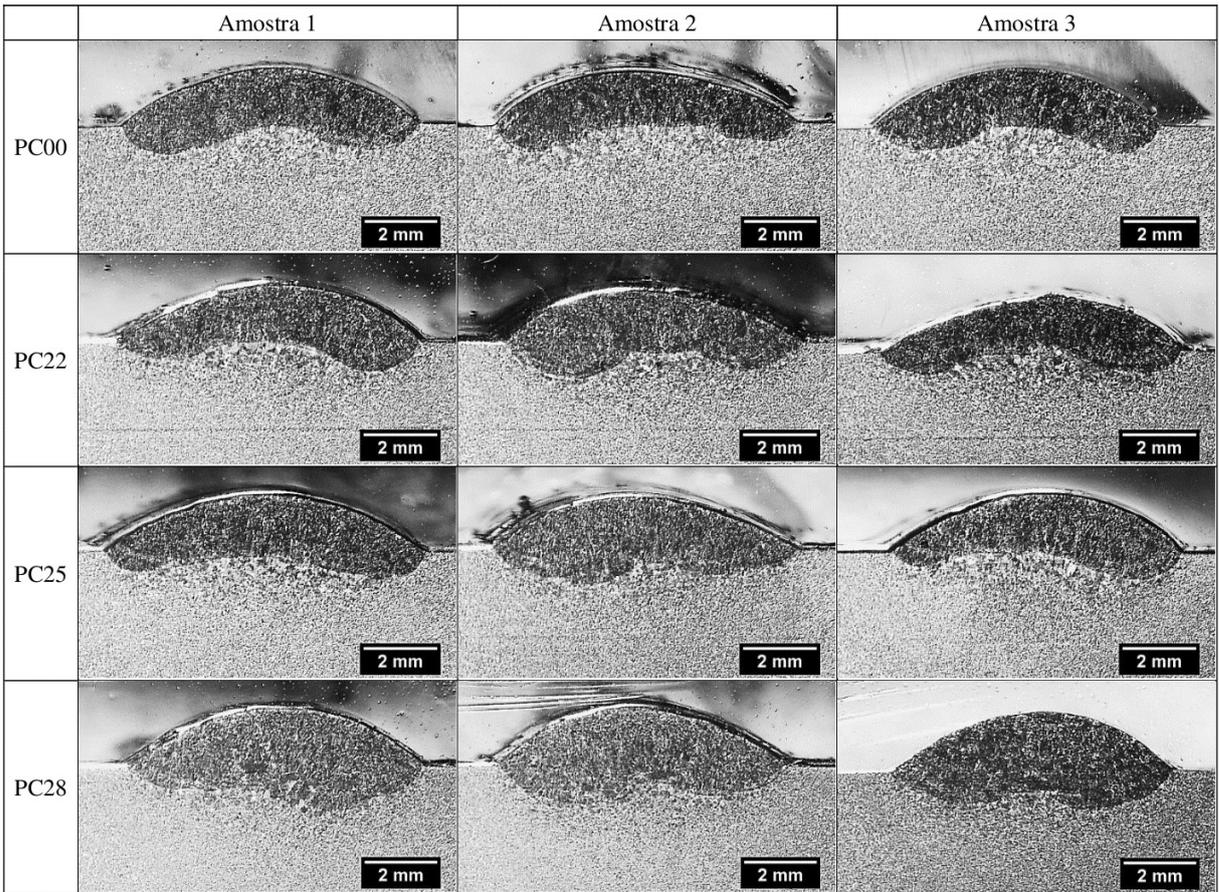
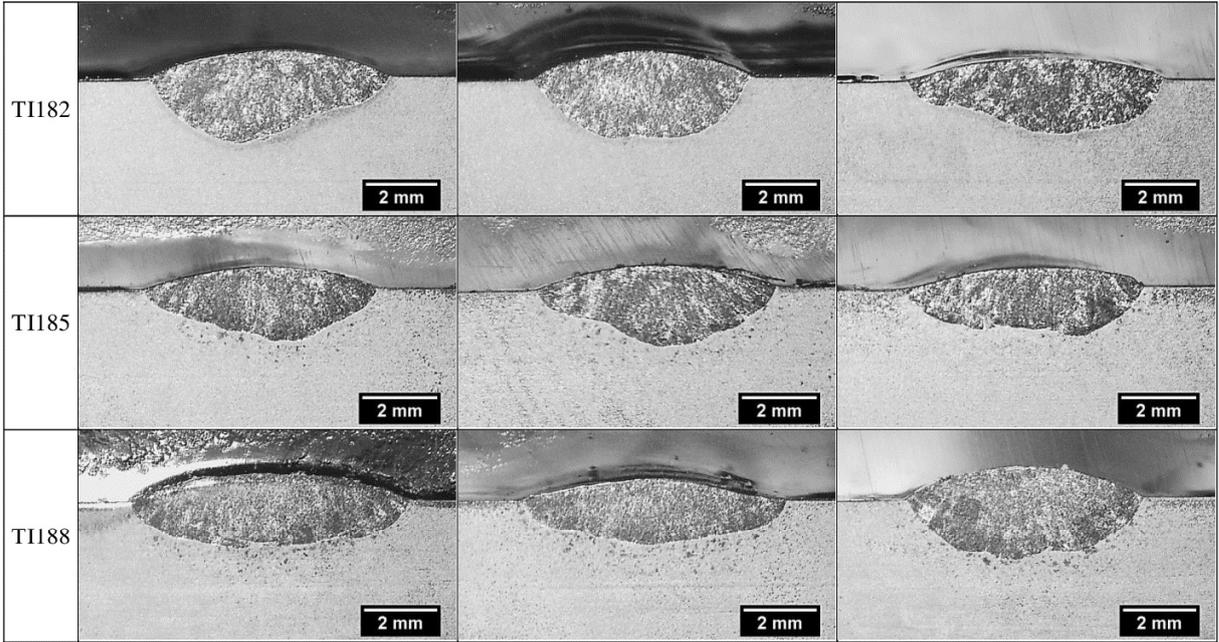
Caract. Geométricas - Seções Transversais

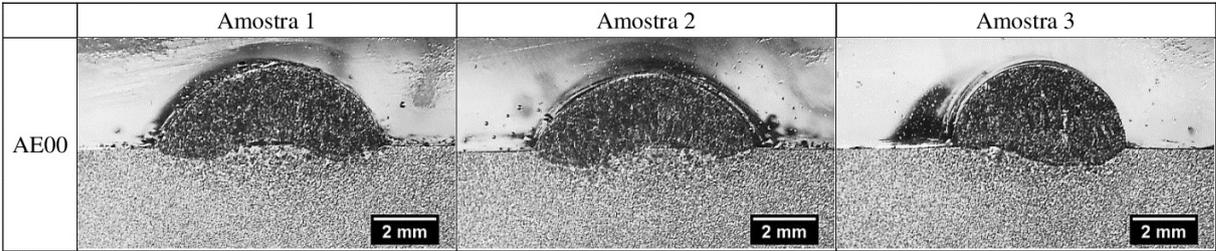
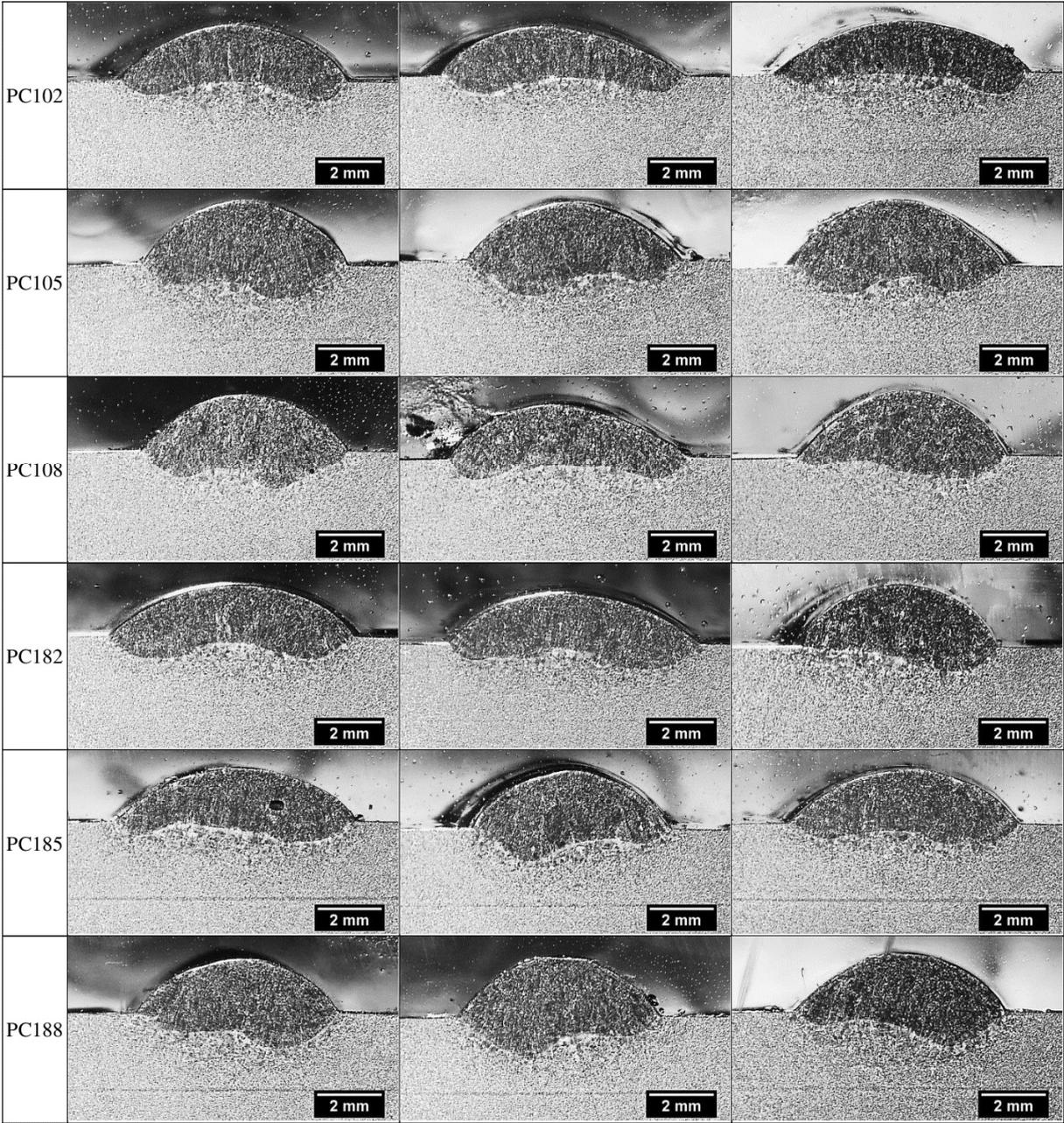
	1	2	3	MÉD
Penetração [mm]	1.8	2.0	1.7	1.8
Reforço [mm]	0.8	0.7	0.8	0.8
Largura [mm]	6.2	6.6	6.1	6.3
Área fundida [mm ²]	10.8	11.4	9.3	10.5
Diluição [%]	69.0	73.2	66.6	69.6

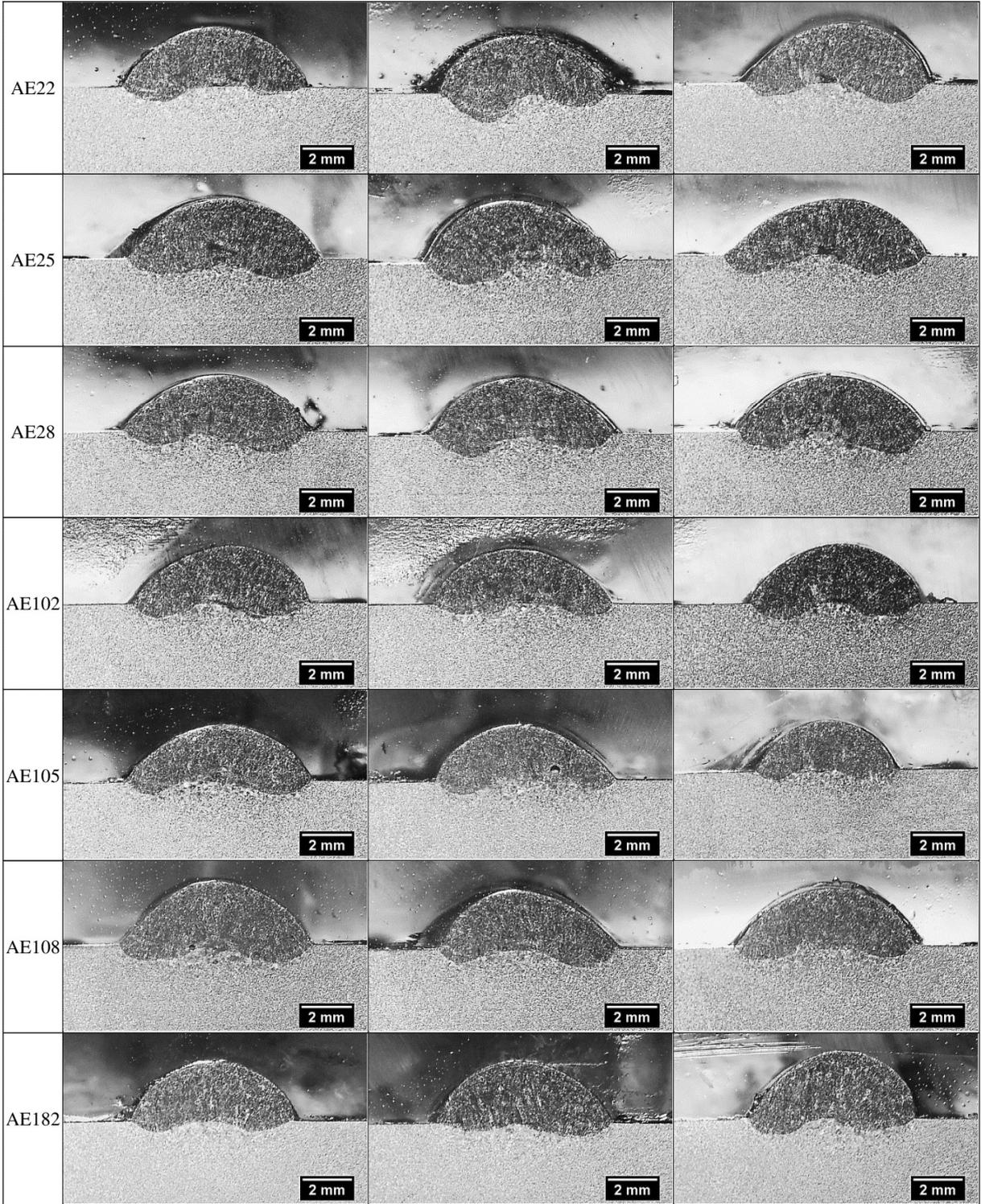


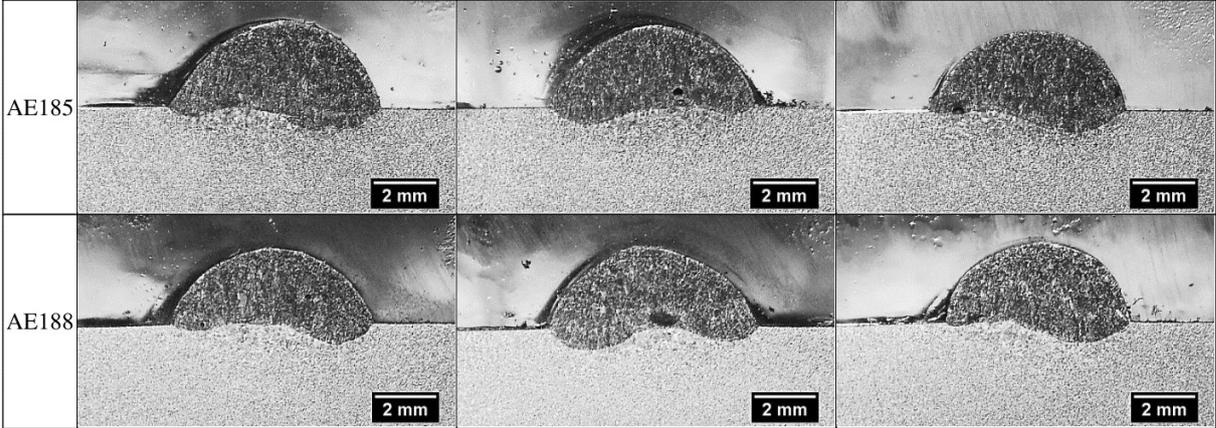
APÊNDICE C – Macrografias das seções transversais











APÊNDICE D – Dados das medições realizadas nas imagens do Apêndice C

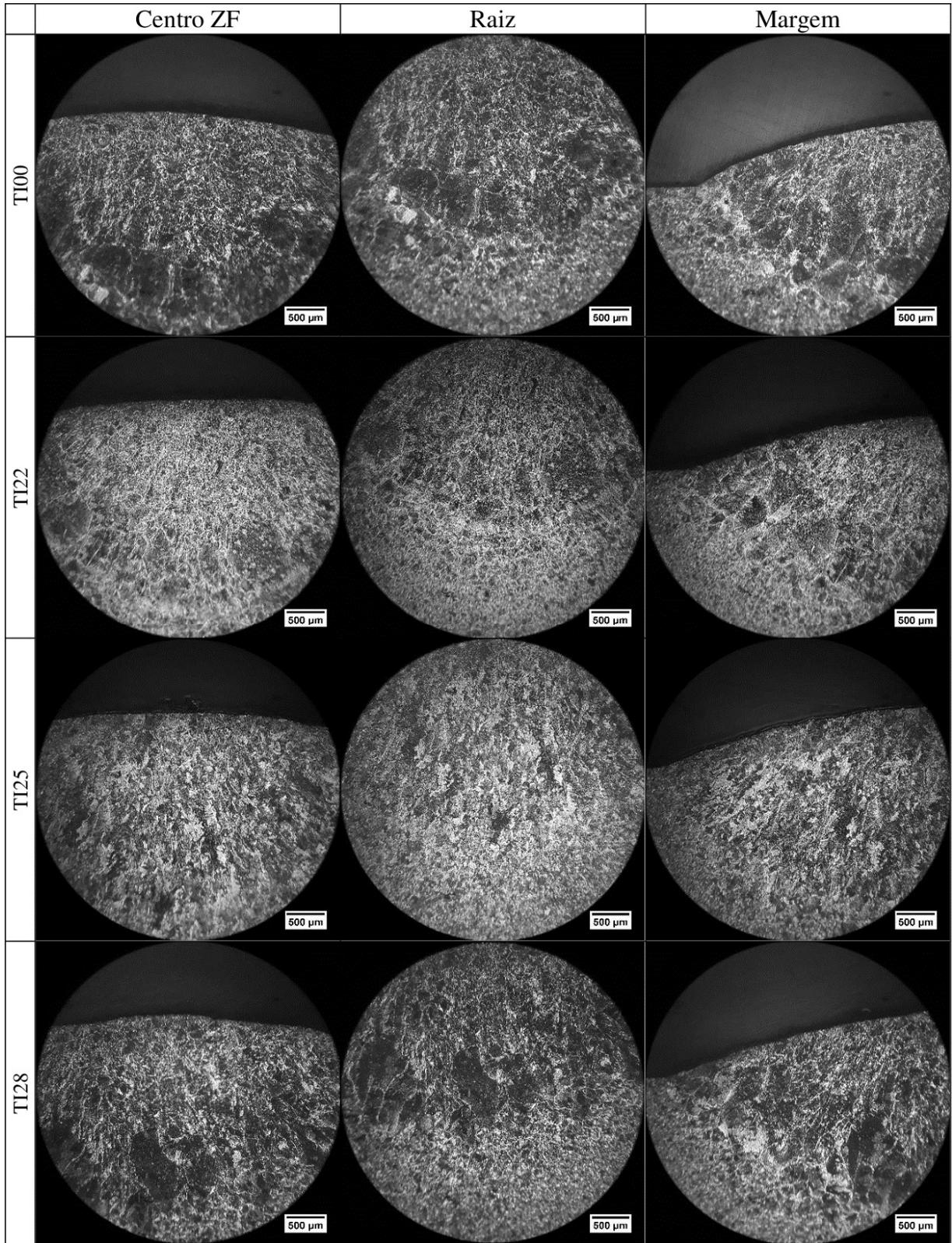
Condição operacional	Amostra/ Média	Penetração [mm]	Reforço [mm]	Largura [mm]	Área fundida [mm ²]	Diluição [%]
PI00	1	1,81	0,84	6,21	10,78	69,02
	2	2,04	0,69	6,61	11,44	73,20
	3	1,66	0,77	6,14	9,29	66,58
	Média	1,84	0,77	6,32	10,51	69,60
PC00	1	0,72	1,69	8,20	12,44	27,89
	2	0,70	1,58	8,42	11,09	21,84
	3	0,68	1,64	7,90	11,90	24,06
	Média	0,70	1,64	8,17	11,81	24,60
AE00	1	0,38	2,66	7,23	14,82	10,81
	2	0,57	2,41	7,02	14,29	15,35
	3	0,53	2,77	5,53	13,53	12,98
	Média	0,49	2,61	6,59	14,21	13,05
PI22	1	1,85	0,82	7,11	11,94	71,12
	2	1,92	0,82	6,86	12,54	74,66
	3	1,69	0,81	7,06	11,76	69,50
	Média	1,82	0,82	7,01	12,08	71,76
PC22	1	0,74	1,72	8,19	11,33	23,98
	2	0,98	1,55	8,02	12,32	38,38
	3	0,58	1,67	8,24	11,02	23,44
	Média	0,76	1,65	8,15	11,56	28,60
AE22	1	0,60	2,48	7,41	14,55	12,08
	2	1,15	2,42	6,98	15,26	24,08
	3	0,79	2,46	7,46	15,66	17,85
	Média	0,84	2,45	7,28	15,15	18,01
PI25	1	1,80	0,82	7,08	12,62	68,98
	2	1,52	0,79	7,10	11,79	69,12
	3	1,72	0,87	6,46	11,93	70,82
	Média	1,68	0,82	6,88	12,11	69,64
PC25	1	0,69	1,69	8,67	12,31	26,05
	2	0,96	1,50	8,35	12,56	37,85
	3	0,69	1,75	7,87	10,99	22,68
	Média	0,78	1,65	8,30	11,95	28,86
AE25	1	0,83	2,35	7,64	16,80	24,01
	2	0,89	2,45	7,72	15,96	22,77
	3	0,83	2,22	8,08	16,09	21,02
	Média	0,85	2,34	7,81	16,28	22,60

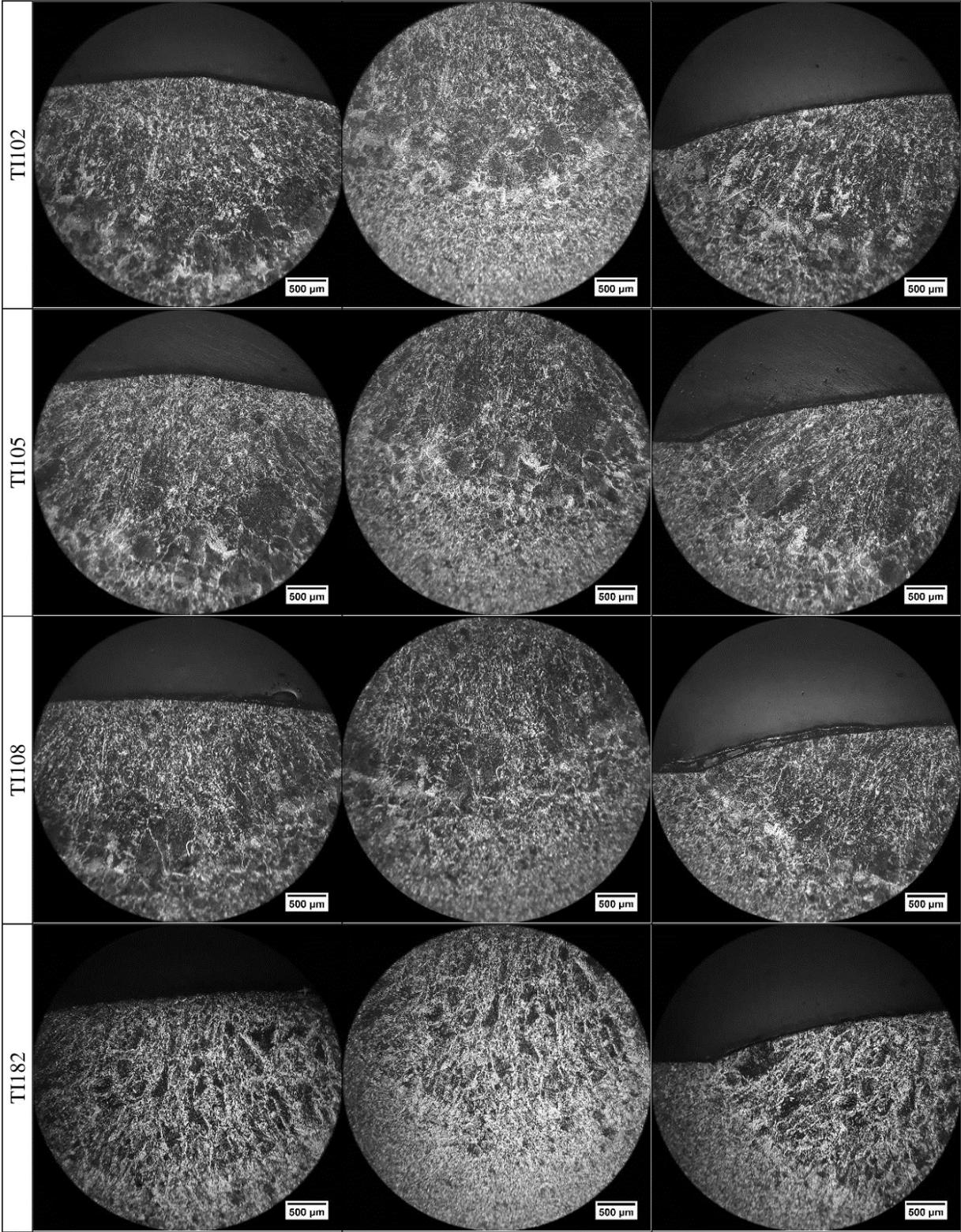
PI28	1	1,63	0,85	7,12	11,73	65,27
	2	1,66	0,77	6,78	11,15	71,50
	3	1,61	0,82	6,87	10,97	69,71
	Média	1,63	0,82	6,92	11,28	68,82
PC28	1	1,30	1,67	8,10	15,06	41,34
	2	1,24	1,65	7,92	14,56	42,73
	3	1,22	1,65	7,87	15,09	41,87
	Média	1,25	1,66	7,96	14,90	41,98
AE28	1	0,94	2,24	7,34	14,98	24,59
	2	0,94	2,09	7,42	15,03	23,39
	3	0,94	2,18	7,49	15,23	23,92
	Média	0,94	2,17	7,42	15,08	23,97
PI102	1	1,68	0,77	6,13	9,26	68,77
	2	1,86	0,75	6,18	10,21	71,67
	3	1,70	0,70	6,41	9,73	68,13
	Média	1,74	0,74	6,24	9,74	69,52
PC102	1	0,57	1,84	7,14	10,91	21,00
	2	0,57	1,55	7,65	10,47	26,15
	3	0,60	1,71	8,01	11,43	21,83
	Média	0,58	1,70	7,60	10,94	22,99
AE102	1	0,63	2,25	7,06	14,49	17,42
	2	0,57	2,14	7,08	12,94	12,95
	3	0,68	2,39	6,81	14,37	18,12
	Média	0,62	2,26	6,98	13,93	16,16
PI105	1	1,72	0,94	6,26	10,86	68,22
	2	1,64	0,63	7,28	10,65	72,99
	3	1,57	0,78	7,12	11,97	71,51
	Média	1,64	0,78	6,89	11,16	70,91
PC105	1	0,93	2,23	6,46	13,70	31,15
	2	0,99	1,90	6,70	12,97	36,55
	3	0,88	2,16	6,72	13,61	29,86
	Média	0,93	2,10	6,62	13,43	32,52
AE105	1	0,59	2,27	7,47	13,89	14,82
	2	0,59	2,26	7,32	13,18	12,77
	3	0,54	1,95	5,68	9,57	14,69
	Média	0,57	2,16	6,82	12,21	14,09
PI108	1	1,55	0,66	6,70	9,62	71,05
	2	1,32	0,66	7,05	9,38	66,76
	3	1,68	0,60	7,24	10,84	72,32
	Média	1,52	0,64	7,00	9,94	70,04

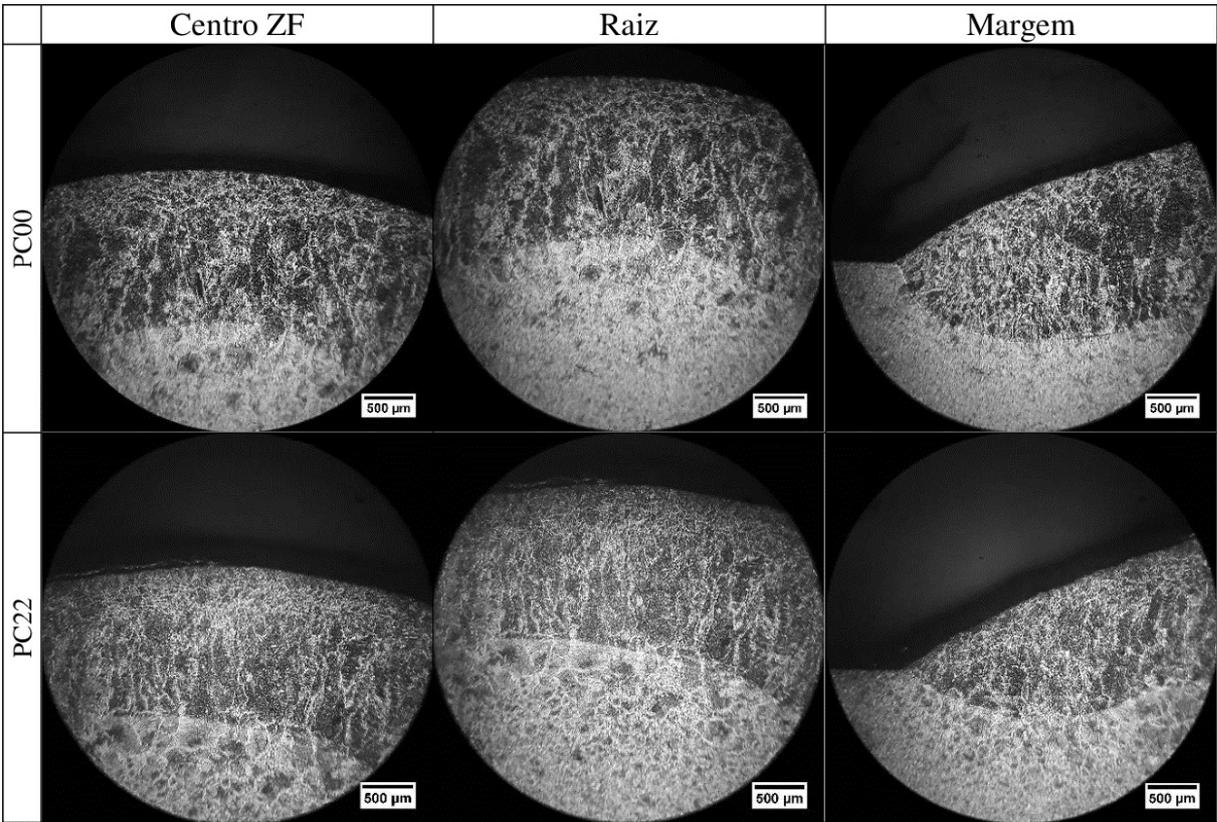
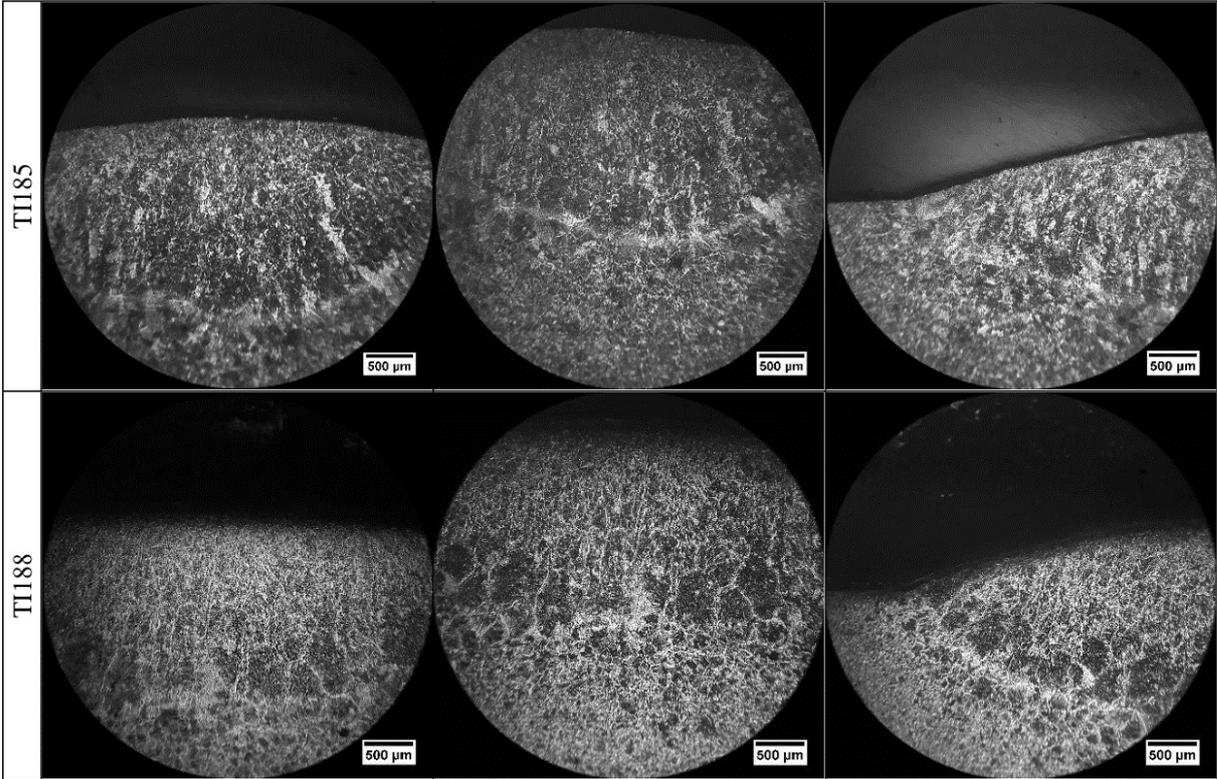
PC108	1	1,20	1,77	6,57	12,80	37,88
	2	0,74	1,63	7,57	11,84	24,77
	3	0,76	2,14	6,64	12,36	21,19
	Média	0,90	1,85	6,93	12,33	27,95
AE108	1	0,77	2,60	7,66	16,67	22,71
	2	0,79	2,28	7,02	13,70	21,57
	3	0,55	2,37	7,14	13,84	17,23
	Média	0,70	2,42	7,27	14,74	20,50
PI182	1	1,67	0,84	6,68	11,22	68,78
	2	1,57	0,79	6,03	10,86	70,03
	3	1,43	0,64	7,15	10,55	72,61
	Média	1,56	0,76	6,62	10,88	70,47
PC182	1	0,69	1,61	7,54	11,82	29,38
	2	0,77	1,55	7,71	11,89	30,04
	3	0,74	1,95	5,88	10,93	21,16
	Média	0,73	1,70	7,04	11,55	26,86
AE182	1	0,50	2,37	6,58	13,21	12,77
	2	0,65	2,46	7,02	14,88	14,94
	3	0,63	2,79	6,83	15,97	15,34
	Média	0,59	2,54	6,81	14,69	14,35
PI185	1	1,33	0,63	6,25	8,18	67,97
	2	1,47	0,66	6,38	9,18	72,52
	3	1,25	0,54	6,52	8,32	70,85
	Média	1,35	0,61	6,38	8,56	70,45
PC185	1	0,66	1,61	7,45	11,24	25,77
	2	0,87	1,90	6,19	10,98	31,58
	3	0,65	1,69	7,21	11,45	26,41
	Média	0,73	1,74	6,95	11,22	27,92
AE185	1	0,83	2,69	6,76	15,83	16,15
	2	0,62	2,52	6,57	13,80	13,33
	3	0,79	2,46	6,33	13,77	14,29
	Média	0,75	2,55	6,55	14,46	14,59
PI188	1	1,21	0,77	7,59	11,66	64,76
	2	1,21	0,61	7,14	8,92	72,61
	3	1,45	0,90	6,45	11,80	66,44
	Média	1,29	0,76	7,06	10,79	67,93
PC188	1	1,13	1,63	6,24	11,40	33,53
	2	1,20	1,90	6,22	12,33	35,57
	3	1,09	1,79	6,48	11,58	31,40
	Média	1,14	1,77	6,31	11,77	33,50

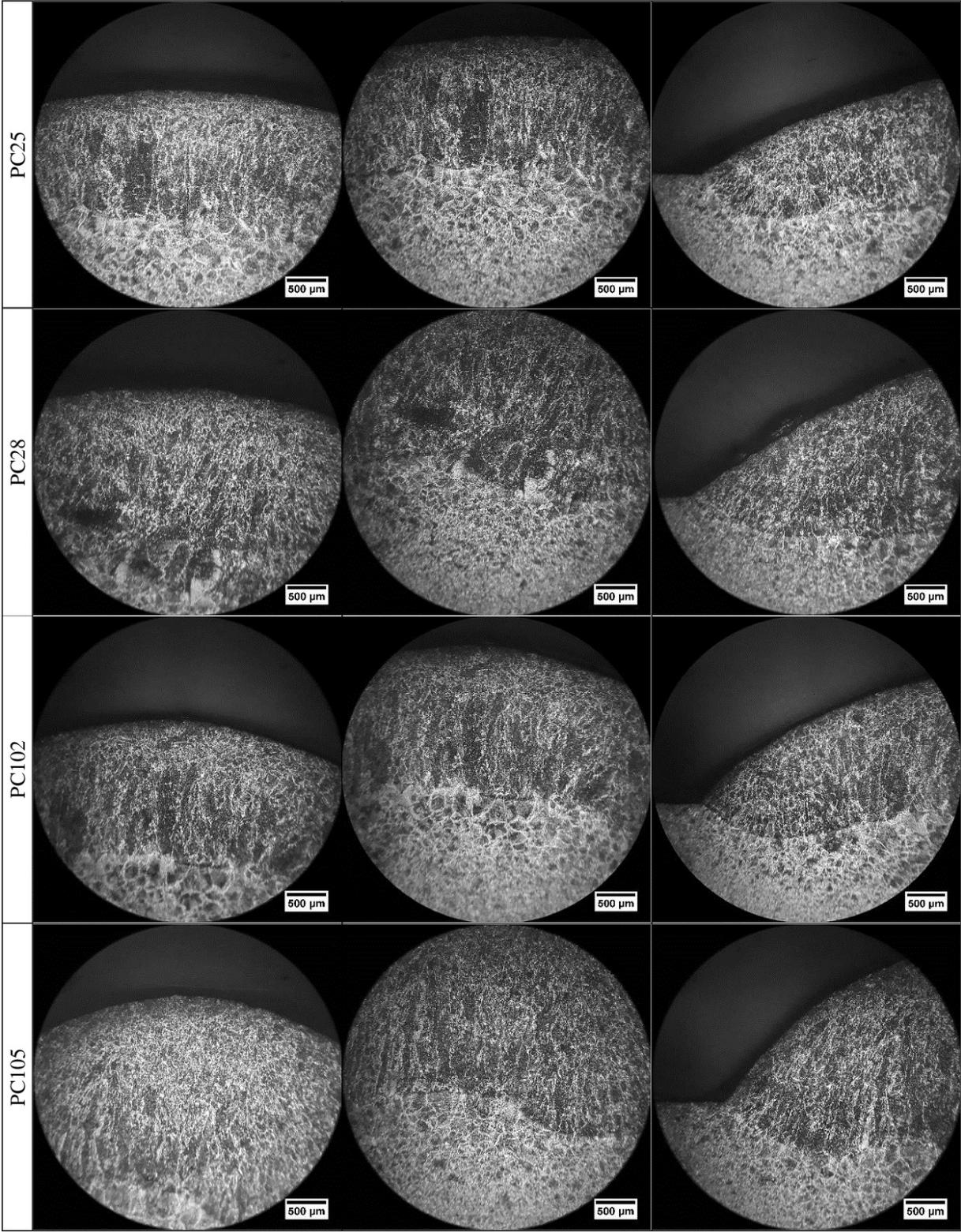
	1	0,69	2,43	6,56	13,46	11,88
AE188	2	0,75	2,67	6,79	15,13	16,89
	3	0,71	2,57	6,00	13,68	13,11
	Média	0,72	2,56	6,45	14,09	13,96

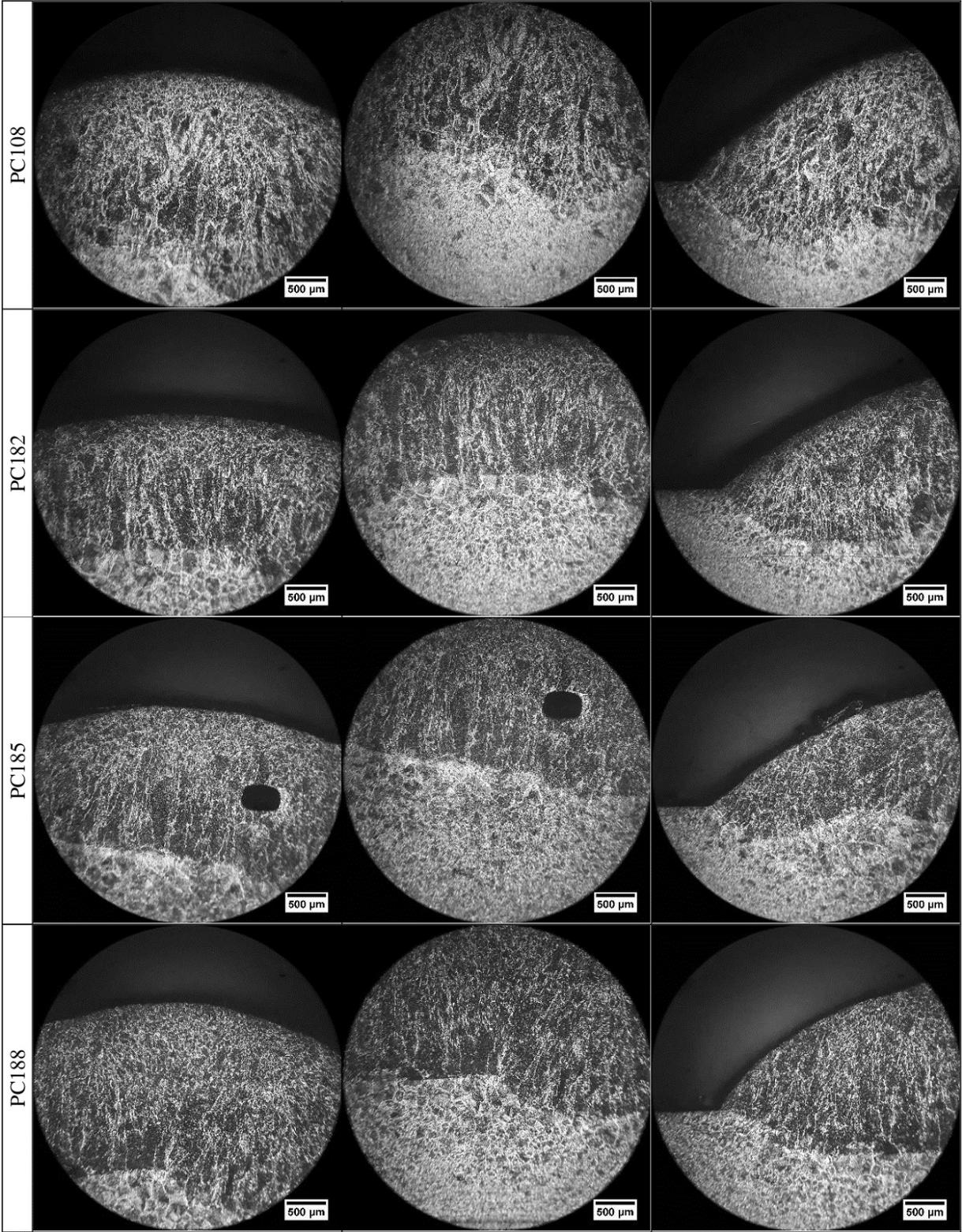
APÊNDICE E – Micrografias

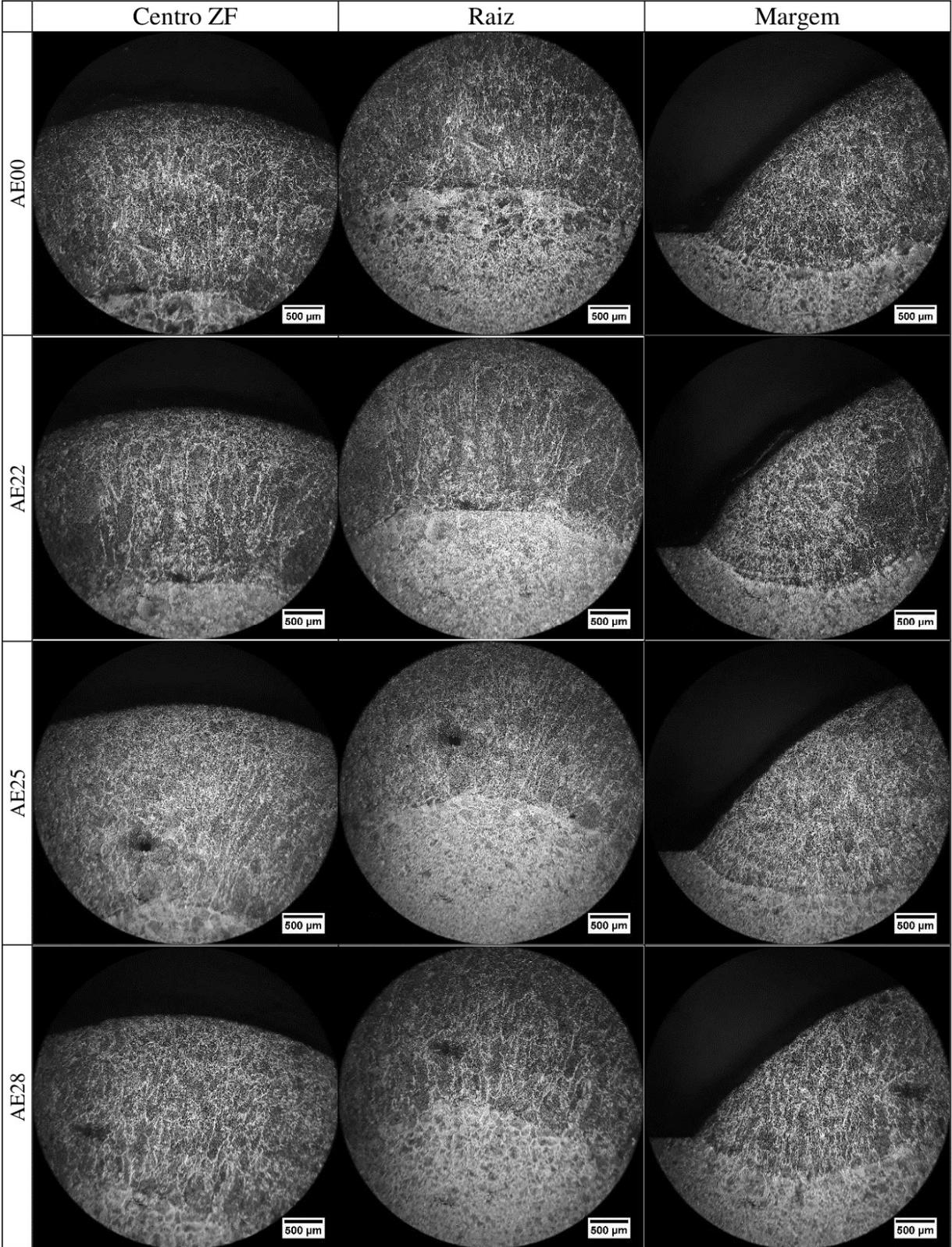


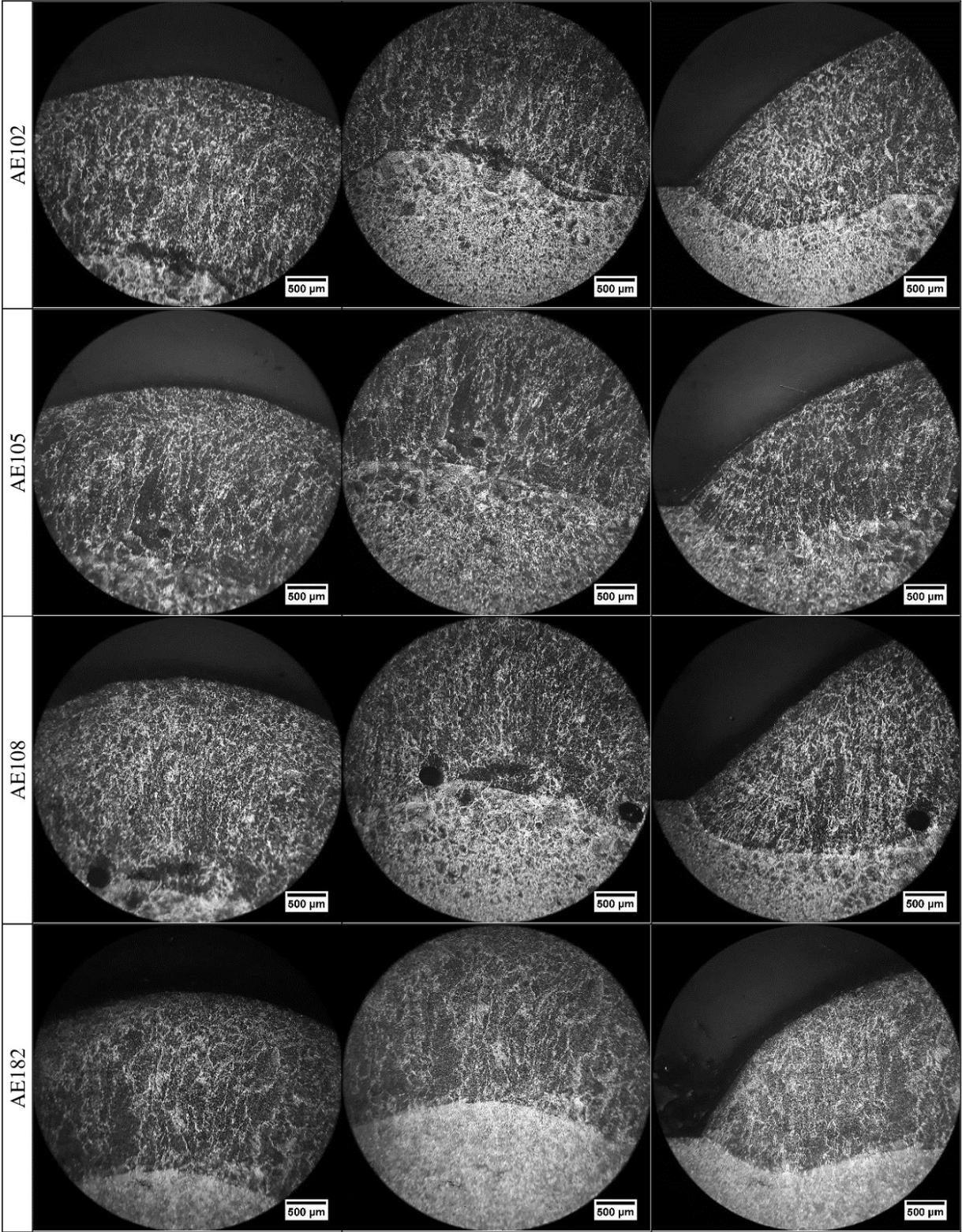


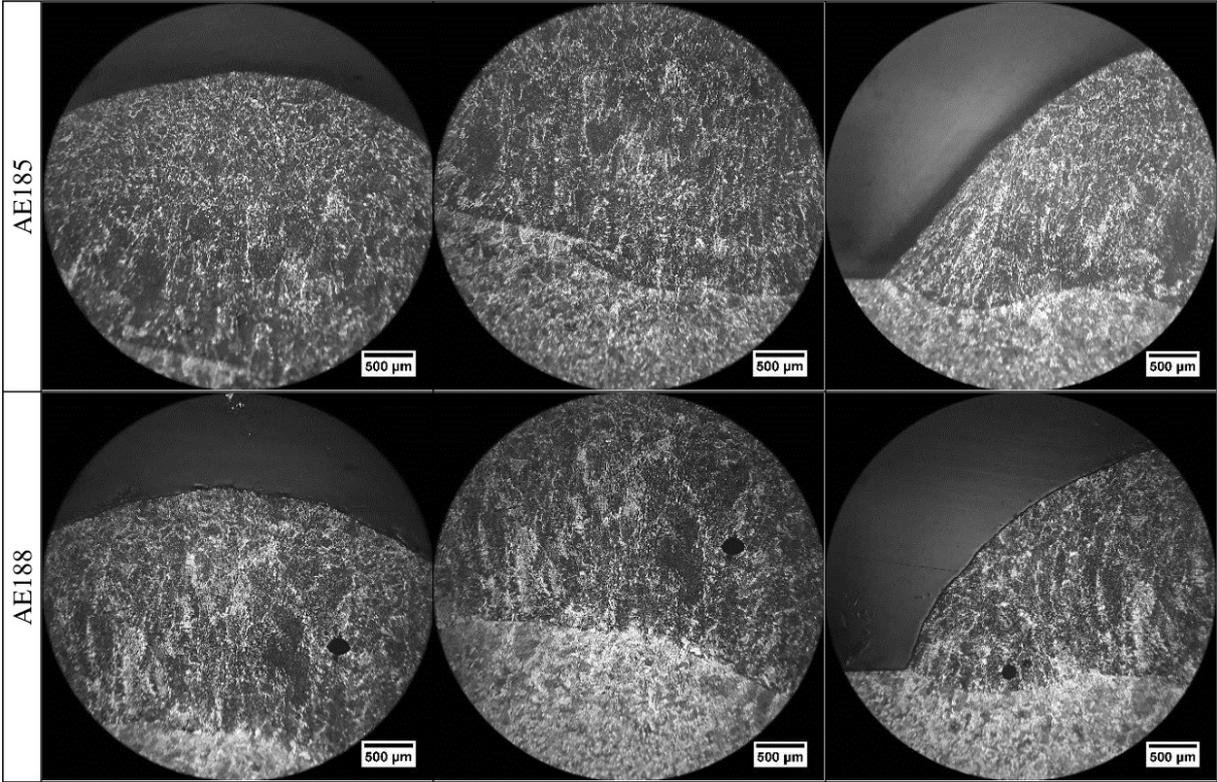












ANEXO A – Certificado de inspeção da chapa de aço utilizada no estudo

<p>USIMINAS USINAS SIDERÚRGICAS DE MINAS GERAIS S.A. USINA JOSÉ BONIFÁCIO DE ANDRADE E SILVA - CUBATÃO/SP/BRASIL R. PROFA. JOSÉ VIEIRA DE MENDONÇA, 3011 BAIRRO ENGENHO NOGUEIRA - CP 806 - CEP: 31319-280 MINAS GERAIS - BRASIL INSCRIÇÃO ESTADUAL: 6283121985115</p>	<p>CERTIFICADO DE INSPEÇÃO INSPECTION CERTIFICATE BOBINA DE AÇO LAMINADA A QUENTE HOT ROLLED STEEL COIL</p>	<p>Cliente-Customer: METALURGICA FALLGATTER LTDA</p>	<p>Nota Fiscal Commercial Invoice D 125598 1</p> <p>Data de Emissão Date of Issue: 20/11/2020</p> <p>Ordem de Venda Sale Order N° 00501697 Item 43</p> <p>N° Certificado Certificate N° 818316</p>																																
<p>Tolerâncias - Tolerances Espessura-Thickness Largura-Width</p> <p>-0,22/+0,22 mm -0,00/+22,00mm</p>		<p>Folha - Sheet = 1 Aparência Superficial - Surface Appearance ABNT SUP 2</p>																																	
<p>Qualidade - Steel SAE-403-14-1012</p>		<p>Dimensões Nominais - Nominal Dimensions 4,75 x 1200,0 mm</p>																																	
<p>Placa Volume Slab Package 342L 41311817</p>		<p>Corrida Fornecedor Run Provider P03072 CSP</p>																																	
<p>Massa Bruta Real Total-Actual Gross Mass = 14,690 t - Massa Líquida Real Total-Actual Net Mass = 14,690 t - Peças - Packages = 1</p>		<p>Massa Líquida Massa Bruta Gross Mass 14,690</p>																																	
<p>Composição Química (%) - Chemical Composition (%)</p>																																			
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Corrida Análise Heat Analysis</th> <th>C</th> <th>Si</th> <th>Mn</th> <th>P</th> <th>S</th> <th>Al</th> <th>Cu</th> <th>Nb</th> <th>V</th> <th>Ti</th> <th>Cr</th> <th>Ni</th> <th>Mo</th> <th>N</th> <th>B</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>P03072 P</td> <td>0,11</td> <td>0,02</td> <td>0,39</td> <td>0,015</td> <td>0,008</td> <td>0,036</td> <td>0,03</td> <td>0,000</td> <td>0,001</td> <td>0,002</td> <td>0,02</td> <td>0,01</td> <td>0,00</td> <td>0,0040</td> <td>0,0001</td> </tr> </tbody> </table>				Corrida Análise Heat Analysis	C	Si	Mn	P	S	Al	Cu	Nb	V	Ti	Cr	Ni	Mo	N	B	P03072 P	0,11	0,02	0,39	0,015	0,008	0,036	0,03	0,000	0,001	0,002	0,02	0,01	0,00	0,0040	0,0001
Corrida Análise Heat Analysis	C	Si	Mn	P	S	Al	Cu	Nb	V	Ti	Cr	Ni	Mo	N	B																				
P03072 P	0,11	0,02	0,39	0,015	0,008	0,036	0,03	0,000	0,001	0,002	0,02	0,01	0,00	0,0040	0,0001																				
<p>Abreviaturas - Abbreviations P = Panela-Ladle</p>																																			
<p>Abreviaturas - Abbreviations Al = Alumínio Total-Total Aluminum</p>																																			
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;"> <p>Sistema de Gestão certificado pelas normas: Management System certified according to the standards: ISO 9.001 ISO 14.001 IATF 16.949 ISO 45.001</p> <p>Produto Certificado Certified Product Produto 100% Reciclável 100% Recyclable Product</p> </div>																																			
<p>Observações - Remarks 4500779/1 FDS - Ficha de Segurança do Produto, disponível na Extranet da Usiminas MSDS - Material Safety Data Sheet available at Usiminas Extranet</p> <p>Certificamos que este material foi inspecionado e possui nível de radiação abaixo de 1 KBq/kg. We certify that this material has been inspected and the radiation level is less than 1 kBq/kg. Certificado do tipo 3.1 da norma EN-10204. Certificate of the type 3.1 of the EN-10204.</p>																																			
<p>GERENTE GERAL CONTROLE INTEGRADO DE QUALIDADE INTEGRATED QUALITY CONTROL GENERAL MANAGER</p>		<p>VISTORADOR SURVEYOR</p>																																	