



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

Júlia Moraes Dornelles

**Análise da influência da frequência de alimentação dinâmica de arame na soldagem com  
processo plasma de aço inoxidável 309L aplicada à manufatura aditiva**

Florianópolis  
2022

Júlia Moraes Dornelles

**Análise da influência da frequência de alimentação dinâmica de arame na soldagem com processo plasma de aço inoxidável 309L aplicada à manufatura aditiva**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica

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

Coorientador: Dr. Eng. Cleber Marques

Florianópolis

2022

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

Dornelles, Júlia Moraes

Análise da influência da frequência de alimentação  
dinâmica de arame na soldagem com processo plasma de aço  
inoxidável 309L aplicada à manufatura aditiva / Júlia  
Moraes Dornelles ; orientador, Régis Henrique Gonçalves  
Silva, coorientador, Cleber Marques, 2022.

125 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Mecânica, Florianópolis, 2022.

Inclui referências.

1. Engenharia Mecânica. 2. PAW. 3. Alimentação pulsada de  
aramé. 4. WAAM. 5. Indústria 4.0. I. Silva, Régis Henrique  
Gonçalves. II. Marques, Cleber. III. Universidade Federal  
de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia  
Mecânica. IV. Título.

**Júlia Moraes Dornelles**

**Análise da influência da frequência de alimentação dinâmica de arame na soldagem com processo plasma de aço inoxidável 309L aplicada à manufatura aditiva**

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

Prof. Dr. Eng. Régis Henrique Gonçalves e Silva  
Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC

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

Prof. Dr. Eng. Luiz Eduardo dos Santos Paes  
Universidade Federal de Uberlândia - UFU

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 Mecânica.

---

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

---

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

Florianópolis, 2022.

Aos meus pais, Ana Rita e Luís Henrique

À minha irmã Luísa

Ao meu companheiro de vida, Lucas

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram para a elaboração desta trabalho. Em especial:

- Ao meu orientador, Prof. Dr. Eng. Régis Henrique Gonçalves e Silva e ao meu coorientador, Dr. Eng. Cleber Marques pelas discussões, aprendizado e orientações nas atividades do mestrado.

- Aos meus amigos grandes amigos do Labsolda, Pedro Jaeger, Daniel Galeazzi, Cleber Guedes e Ivan Pigozzo pela ajuda direta na realização deste trabalho.

- Aos demais colegas do Labsolda, especialmente Kauê Riffel, Marcelo Okuyama, Fernando Costenaro, Rodrigo Nogueira, Isabel Mattos, Alberto Bonamigo, Vitor Igor da Cunha e Alisson da Rosa pelas experiências compartilhadas, pelo apoio técnico durante a realização deste trabalho e, sobretudo, pela amizade.

- Ao Prof. Dr. Eng. Carlos Enrique Niño Bohórquez por estar sempre disposto a ajudar e por toda transmissão de conhecimento.

- Ao programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e à CAPES pelo apoio financeiro.

- Agradeço as minhas amigas de longa data, Jéssica Razuk, Fernanda Stumpf, Allana Gindri, Bruna Polmann, Letícia Machado, Ana Flávia Costa e Cristyelen Feksa pela cumplicidade, alegria compartilhada, longas conversas e conselhos. Vocês são fundamentais.

- Agradeço imensamente meus pais, Ana Rita e Luís Henrique e minha irmã Luísa pelo incentivo, suporte emocional e financeiro e pelo amor de sempre. Vocês são tudo para mim.

- Agradeço meu companheiro Lucas Colla, nossa cachorrinha Lolita, meus sogros Sabrina Angeloni e Norberto Colla, meus cunhados Isabelle Colla e Alexandre Machado e minha sobrinha Helena Angeloni por todo amor e carinho a mim dedicados.

Eu não quero acreditar, eu quero conhecer.

(Carl Sagan)

## RESUMO

A manufatura aditiva vem performando como uma tecnologia emergente na fabricação de componentes funcionais para sistemas mecânicos na indústria em geral. A manufatura aditiva com energia direcionada, em específico por processos de soldagem, tem ganhado espaço especialmente pela capacidade de produção de peças *just in time* e alta personalização tanto geométrica quanto física. Além disso, a grande diversidade de materiais e processos disponíveis para utilização abrem espaço para infinitas possibilidades de aplicação. Neste contexto, diferentes técnicas de alimentação de arame vêm sendo desenvolvidas e estudadas para fornecer benefícios no processo e no resultado das peças construídas via WAAM (*Wire Arc Additive Manufacturing*). Por esta razão, a caracterização das amostras produzidas pelo método WAAM é necessária para otimizar os parâmetros do processo. O foco deste trabalho é avaliar a influência da frequência de alimentação dinâmica de arame no processo de soldagem Plasma, no que diz respeito às características geométricas, termofísicas e metalúrgicas de cordões de solda depositados sobre chapa e de paredes construídas por manufatura aditiva, utilizando como material de adição arame de aço inoxidável 309L. Foram comparadas diferentes frequências de alimentação e as análises foram realizadas com auxílio de câmera de alta velocidade, câmera termográfica e um sistema de aquisição dos sinais elétricos. Como principais resultados verificou-se que a soldagem com alimentação dinâmica em altas frequências, 12 Hz e 15 Hz, originou cordões mais altos e com penetração mais homogênea quando comparado à alimentação contínua de arame. A alimentação dinâmica apresentou potência média e temperatura levemente superiores às obtidas na soldagem com alimentação contínua de arame. A microestrutura das paredes soldadas foi avaliada e a parede com alimentação em frequência de 15 Hz apresentou fase ferrítica mais dispersa na matriz austenítica e aumento de 7,5% na microdureza em relação à alimentação contínua. Os oscilogramas de tensão e de velocidade de arame podem ser usados como um indicativo de estabilidade do processo e da transferência metálica. De maneira geral, o processo plasma com alimentação dinâmica mostrou-se adequado para aplicação na manufatura aditiva, resultando em paredes íntegras e com ausência de defeitos.

**Palavras-chave:** PAW. Alimentação pulsada de arame. WAAM. Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA). Indústria 4.0. Aço inoxidável. Impressão 3D.



## ABSTRACT

Additive manufacturing has been performing as an emerging technology in the manufacture of functional components for mechanical systems in the industry in general. Additive manufacturing with directed energy, specifically by welding processes, has gained space, especially due to the ability to produce just-in-time parts and high customization, both geometric and physical. In addition, the great diversity of materials and processes available for use makes room for infinite application possibilities. In this context, different wire feeding techniques have been developed and studied to provide benefits in the process and in the result of parts built via WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing). For this reason, the characterization of samples produced by the WAAM method is crucial to optimize the process parameters. The focus of this work is to evaluate the influence of dynamic wire feeding frequency in the Plasma welding process, regarding the geometric, thermophysical and metallurgical characteristics of weld beads deposited on plate and walls built by additive manufacturing, using as material addition of 309L stainless steel wire. Different wire feeding frequencies were compared and the analyzes were performed with the aid of a high-speed camera, thermographic camera, and an electrical signal acquisition system. As main results, it was found that welding with dynamic wire feeding at high frequencies, 12 Hz and 15 Hz, create higher beads and more homogeneous penetration profile when compared to continuous wire feeding. The dynamic feeding presented average power and temperature slightly higher than those obtained in welding with continuous wire feeding. The microstructure of the welded walls was analyzed, and the wall fed at a frequency of 15 Hz showed a more dispersed ferritic phase in the austenitic matrix and a 7.5% increase in microhardness in relation to continuous feeding. Voltage and wire feeding speed oscillograms can be used as an indication of process stability and metal transfer. In general, the Plasma welding processes using dynamic wire feeding proved to be suitable for application in additive manufacturing, resulting in uniform walls with no defects.

**Keywords:** PAW. Pulsed wire feeding. WAAM. Industry 4.0. Stainless steel. 3D printing.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquemático ilustrativo do bocal da tocha plasma. ....	18
Figura 2. Esquemático do Módulo de Alimentação Dinâmica indicando os principais componentes. ....	21
Figura 3. Representação da dinâmica de movimentação de arame ideal no modo oscilante. ....	21
Figura 4. Gráfico ilustrativo do comportamento da velocidade de arame ao longo do tempo na alimentação dinâmica oscilante. ....	22
Figura 5. Gráfico ilustrativo do comportamento da velocidade de arame ao longo do tempo na alimentação dinâmica pulsada. ....	23
Figura 6. Oscilograma de corrente, tensão e velocidade de arame pulsada no processo TIG. ....	23
Figura 7. Ilustração esquemática dos modos de transferência metálica. (a) Ponte contínua (b) Ponte intermitente (c) Gota intermitente. ....	26
Figura 8. Esquemático da conexão do sistema de medição da tensão entre o eletrodo e a peça e entre o eletrodo e o arame. ....	28
Figura 9. Oscilogramas referentes ao modo de transferência metálica (a) por ponte contínua e (b) ponte intermitente. ....	29
Figura 10. Oscilograma referente ao modo de transferência metálica por gota intermitente, evidenciando o comportamento instável. ....	29
Figura 11. Variação na geometria das extremidades da parede construída por WAAM. ....	30
Figura 12. Fluxograma ilustrativo da metodologia de ensaios e análises aplicados. .	35
Figura 13. Bancada de ensaios: (a) Fonte de energia, (b) controlador do módulo de alimentação dinâmica, (c) tocha plasma, (d) manipulador robótico, (e) câmera térmica, (f) sistema de aquisição portátil (SAP), (g) módulo de alimentação dinâmica (MAD). ....	37
Figura 14. Bancada de ensaios: (c) Tocha plasma, (d) controlador do manipulador robótico e manipulador robótico, (g) módulo de alimentação dinâmica (MAD). ....	37
Figura 15. (a) Módulo de alimentação dinâmica (MAD) e (b) Sistema Cartesiano de Soldagem (SCS). ....	38
Figura 16. Tocha de soldagem plasma PWM 300 e direcionador de arame. ....	39
Figura 17. Câmera de filmagem em alta velocidade IDT, modelo Y4S2. ....	39

Figura 18. (a) Sistema de Aquisição de dados Portátil dedicado à soldagem (SAP) e (b) Sistema de Aquisição de Temperatura (SAT). .....	40
Figura 19. Aspecto irregular dos cordões depositados nos ensaios iniciais com o processo plasma alimentado. ....	42
Figura 20. Direcionador de arame utilizado nos ensaios iniciais com o processo plasma após a implementação das travas nos eixos de movimentação. ....	42
Figura 21. Cordões depositados nos ensaios iniciais evidenciando o arame solidificado junto com a poça ao final do processo. ....	43
Figura 22. Display da fonte de soldagem com as novas variáveis desenvolvidas para soldagem plasma com alimentação de arame. ....	44
Figura 23. Cordões depositados após as modificações realizadas no direcionador de arame e no programa plasma da fonte de soldagem. ....	44
Figura 24. Alimentador duplo de arame desenvolvido no Labsolda para aplicação na manufatura aditiva com o processo plasma. ....	46
Figura 25. Base refrigerada desenvolvida para auxiliar no resfriamento da chapa durante a soldagem. ....	47
Figura 26. Tocha de soldagem com os principais parâmetros de posicionamento das variáveis do processo. ....	48
Figura 27. Bico constritor da tocha plasma PWM 300 com diâmetro de 3,2 mm e diâmetro de 3,9 mm. ....	49
Figura 28. Arame em seu máximo avanço (a) e máximo recuo (b) ilustrando a amplitude de oscilação. ....	52
Figura 29. Tocha de soldagem com os principais parâmetros de posicionamento evidenciando a posição inicial da ponta do arame antes do ensaio de definição da amplitude. ....	53
Figura 30. Esquemático do posicionamento dos cordões soldados na chapa base. ...	54
Figura 31. Esquemático da configuração utilizada para ajuste da amplitude juntamente com câmara slow-motion. ....	55
Figura 32. Posicionamento dos termopares na soldagem dos cordões. ....	56
Figura 33. Disposição da bancada de ensaios para a filmagem em alta velocidade. .	56
Figura 34. Metodologia de construção das paredes. ....	58
Figura 35. Ensaio para aquisição da velocidade de alimentação de arame, evidenciando o posicionamento do <i>encoder</i> e do direcionador de arame. ....	60

Figura 36. Indicação das linhas de corte para análise macrográfica dos cordões. ....	61
Figura 37. Esquemático das grandezas medidas nos cordões e cálculo da diluição. .	61
Figura 38. Indicação das linhas de corte no sentido transversal das paredes. ....	62
Figura 39. Parede após os cortes no sentido transversal e longitudinal. ....	62
Figura 40. Metodologia de análise de temperatura dos cordões através dos vídeos obtidos pela filmagem térmica. ....	63
Figura 41. Metodologia de análise de temperatura das paredes através dos vídeos obtidos pela filmagem térmica. ....	64
Figura 42. (a) Pontos de medição de microdureza, (b) pontos de medição de fase ferrítica e (c) áreas de análise da microestrutura das paredes. ....	65
Figura 43. Oscilograma de corrente e tensão da soldagem com alimentação contínua de arame. ....	66
Figura 44. Oscilograma esquemático correlacionando a tensão do arame com o movimento do arame ao longo de um ciclo. ....	67
Figura 45. Oscilograma de corrente e tensão da soldagem com alimentação dinâmica de arame com frequência de 3 Hz. ....	68
Figura 46. Oscilograma de corrente e tensão da soldagem com alimentação dinâmica de arame com frequência de 6 Hz. ....	69
Figura 47. Oscilograma de corrente e tensão da soldagem com alimentação dinâmica de arame com frequência de 9 Hz. ....	70
Figura 48. Oscilograma de corrente e tensão da soldagem com alimentação dinâmica de arame com frequência de 12 Hz. ....	70
Figura 49. Oscilograma de corrente e tensão da soldagem com alimentação dinâmica de arame com frequência de 15 Hz. ....	71
Figura 50. Gráfico da velocidade x tempo da soldagem com alimentação contínua de arame. ....	74
Figura 51. Gráfico esquemático correlacionando a velocidade e o movimento do arame nos períodos de avanço e recuo. ....	75
Figura 52. Gráfico velocidade x tempo para soldagem com alimentação dinâmica de 3 Hz. Em detalhe o comportamento do arame no tempo de 0,5 segundos. ....	76
Figura 53. Gráfico velocidade x tempo para soldagem com alimentação dinâmica de 6 Hz. ....	77
Figura 54. Gráfico velocidade x tempo para soldagem com alimentação dinâmica de 9 Hz. ....	78

Figura 55. Gráfico velocidade x tempo para soldagem com alimentação dinâmica de 12 Hz. ....	78
Figura 56. Gráfico velocidade x tempo para soldagem com alimentação dinâmica de 15 Hz. ....	78
Figura 57. Imagem da soldagem com alimentação contínua de arame obtida pela filmagem de alta velocidade. Vídeo .....	79
Figura 58. Imagens da soldagem com frequência de oscilação de arame de 3 Hz. (a) Momento em que o arame está em movimento de recuo da poça instantes antes do rompimento da ponte entre a ponta do arame e a poça. (b) Arame em posição de recuo total. Vídeo .....	80
Figura 59. Momento em que uma porção de metal líquido está no topo da poça a uma altura maior que o cordão já solidificado. Soldagem com frequência de 3 Hz. Vídeo .....	80
Figura 60. Imagens da soldagem com frequência de oscilação de arame de 6 Hz. (a) Momento em que o arame está em movimento de recuo da poça instantes antes do rompimento da ponte entre a ponta do arame e a poça. (b) Arame em posição de recuo total. Vídeo .....	81
Figura 61. Momento em que uma porção de metal líquido está no topo da poça a uma altura maior que o cordão já solidificado. Soldagem com frequência de 6 Hz. Vídeo .....	82
Figura 62. Imagens da soldagem com frequência de oscilação de arame de 9 Hz. (a) Momento em que o arame está em movimento de recuo da poça instantes antes do rompimento da ponte entre a ponta do arame e a poça. (b) Arame em posição de recuo total. Vídeo .....	83
Figura 63. Momento em que uma porção de metal líquido está no topo da poça a uma altura maior que o cordão já solidificado. Soldagem com frequência de 9 Hz. Vídeo .....	83
Figura 64. Imagens da soldagem com frequência de oscilação de arame de 12 Hz. (a) Momento em que o arame está em movimento de recuo da poça instantes antes do rompimento da ponte entre a ponta do arame e a poça. (b) Arame em posição de recuo total. Vídeo .....	84
Figura 65. Momento em que uma porção de metal líquido está no topo da poça a uma altura maior que o cordão já solidificado. Soldagem com frequência de 12 Hz. Vídeo .....	84
Figura 66. Imagens da soldagem com frequência de oscilação de arame de 15 Hz. (a) Momento em que o arame está em movimento de recuo da poça instantes antes do	

rompimento da ponte entre a ponta do arame e a poça. (b) Arame em posição de recuo total. Vídeo .....	85
Figura 67. Momentos em que uma porção de metal líquido está no topo da poça a uma altura maior que o cordão já solidificado. (a) primeira ocorrência, com arame dentro da poça (b) Segunda ocorrência, após o rompimento da ponte metálica. Soldagem com frequência de 15 Hz. Vídeo .....	86
Figura 68. Resultado dos cordões soldados para as diferentes frequências de alimentação de arame. ....	87
Figura 69. Superfície dos cordões soldados. ....	88
Figura 70. Resultados do corte transversal dos cordões para as diferentes frequências de alimentação de arame.....	89
Figura 71. Curvas de temperatura obtidas através de termopares. ....	92
Figura 72. Curvas de temperatura obtidas através de termopares para os cordões soldados com frequência de alimentação de arame de 0 Hz, 12 Hz e 15 Hz. ....	94
Figura 73. Gradiente térmico obtido nos cordões soldados com frequência de 0 Hz, 9Hz e 15 Hz. ....	95
Figura 74. Tensão média do arco e arame por camada, para as três paredes soldadas com frequência de 0 Hz, 9 Hz e 15 Hz. ....	96
Figura 75. (a) Comportamento do arco nos períodos em que o arame está fora da poça durante a soldagem com alimentação dinâmica de arame. (b) Comportamento do arco nos momentos em que o arame está dentro da poça durante a soldagem com alimentação dinâmica e durante a soldagem com alimentação contínua de arame. ....	97
Figura 76. Valores de potência média por camada das paredes soldadas com 0 Hz, 9 Hz e 15 Hz. ....	98
Figura 77. Imagens das paredes soldadas com frequência de alimentação de 0 Hz, 9 Hz e 15 Hz, apresentando a vista frontal, superior e lateral. ....	99
Figura 78. Corte transversal das paredes com a área efetiva destacada. Os retângulos com linha contínua demarcam a maior área efetiva das paredes e os com linha tracejada demarcam a área efetiva sem excluir a base das paredes. ....	101
Figura 79. Gradiente térmico obtido na camada 10 das paredes soldadas com frequência de 0 Hz, 9 Hz e 15 Hz. ....	103
Figura 80. Gradiente térmico obtido na camada 20 das paredes soldadas com frequência de 0 Hz, 9 Hz e 15 Hz. ....	104

Figura 81. Gradiente térmico obtido na camada 30 das paredes soldadas com frequência de 0 Hz, 9 Hz e 15 Hz.....	104
Figura 82. Imagens da camada 30 de cada parede obtidas pela câmera térmica evidenciando as isotermas das paredes.....	105
Figura 83. Resultado do ensaio de Raio – X realizado nas paredes.....	106
Figura 84. Figura Imagens da microestrutura do centro das paredes realizadas no sentido transversal e longitudinal com ampliação de 500X. ....	108
Figura 85. Imagens da microestrutura do centro das paredes realizadas no sentido transversal e longitudinal com ampliação de 4000X, com destaque para as áreas analisadas via EDS.....	110
Figura 86. Perfil de fase ferrítica ao longo das paredes. ....	111
Figura 87. Resultado ensaio de microdureza realizado nas paredes. ....	112
Figura 88. Resultado da análise química realizada nas paredes via espectrometria de emissão óptica. ....	113

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Composição química da chapa de aço AISI 1010 realizada via OES. ....	40
Tabela 2. Composição química do arame 309 L realizada via OES. ....	41
Tabela 3. Parâmetros utilizados nos ensaios iniciais de preparação da bancada. ....	45
Tabela 4. Parâmetros de soldagem definidos para realização dos ensaios de soldagem dos cordões e das paredes. ....	50
Tabela 5. Matriz de ensaios definida para soldagem de depósito dos cordões sobre chapa. ....	53
Tabela 6. Distribuição de procedimentos de instrumentação nos ensaios com cordões sobre chapa. ....	54
Tabela 7. Matriz de ensaio definida para as paredes. ....	57
Tabela 8. Média das aquisições elétricas, tensão do arco, tensão arco-aramé, corrente e potência para todas as frequências estudadas. ....	72
Tabela 9. Média das aquisições elétricas, tensão do arco, tensão arco-aramé, corrente e potência para todas as frequências estudadas. ....	73
Tabela 10. Valores de velocidade de arame máxima, mínima e média para as diferentes frequências. ....	76
Tabela 11. Valores médios de altura, largura, área total, área diluída e diluição para todas as frequências estudadas. ....	90
Tabela 12. Máximas temperaturas atingidas pelo termopar com a respectiva distância entre o termopar e a borda do cordão soldado. ....	93
Tabela 13. Média dos sinais elétricos das 30 camadas de cada parede soldada. ....	97
Tabela 14. Dimensões das paredes. ....	100
Tabela 15. Área efetiva da seção transversal das paredes. ....	102
Tabela 16. Resultado da análise química das fases realizado via EDS. ....	111



## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

- A – Área reforço do cordão de solda  
A - Amplitude  
A<sub>1</sub> – Área abaixo do gráfico de velocidade x tempo correspondente ao deslocamento de avanço  
A<sub>2</sub> – Área abaixo do gráfico de velocidade x tempo correspondente ao deslocamento de recuo  
ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas  
AISI – *American Iron and Steel Institute*  
Ar – Argônio  
ASME – *American Society of Mechanical Engineers*  
ASTM – *American Society Testing Materials*  
AWS – *American Welding Society*  
B – Área diluída do cordão  
BTF – *Buy-to-fly*  
CAD – Desenho Assistido por Computador  
CMT – *Cold Metal Transfer*  
CNC – Comando Numérico Computadorizado  
d - Distância  
DBP – Distância Bico Peça  
EBM Eletron Beam Melting  
EDS - Espectroscopia por energia dispersiva  
f – Frequência  
G – Gradiente térmico  
ISO – *International Organization for Standardization*  
LABSOLDA – Instituto de Soldagem e Mecatrônica  
LBD – *Laser Beam Deposition*  
Lcn – Largura cordão n  
MA – Manufatura Aditiva  
MAD – Módulo de Alimentação Dinâmica  
MEV – Microscópio Eletrônico de Varredura  
MIG/MAG – *Metal Inert Gas / Metal Active Gas*  
MVG – Medidor de Vazão de Gás  
MO – Microscópio Óptico  
OES – *Optical Emission spectroscopy*  
PAM – *Plasma Arc Additive Manufacturing*  
PAW – *Plasma Arc Welding*  
SAE – *Society of Automotive Engineers*  
SAP – Sistema de Aquisição Portátil  
SAT – Sistema de Aquisição de Temperatura  
SCS – Sistema Cartesiano de Soldagem  
t – Tempo

ta – tempo de avanço  
ta<sub>f</sub> – Tempo arame fim  
ta<sub>i</sub> – Tempo arame início  
TIG – *Tungsten Inert Gas welding*  
tr – tempo de recuo  
tra – Tempo recuo arame  
t<sub>0</sub> – Tempo de avanço de arame  
t<sub>1</sub> – Tempo correspondente ao término do avanço e início do recuo  
t<sub>2</sub> – Tempo correspondente ao término do recuo  
V<sub>a</sub> – Velocidade de alimentação de arame  
V<sub>a</sub> – Velocidade de avanço  
V<sub>br</sub> – Velocidade bloco de roletes  
V<sub>r</sub> – Velocidade de recuo  
V<sub>s</sub> – Velocidade de soldagem  
X – Eixo de movimentação da mesa  
Y – Eixo de movimentação da tocha  
Z – Eixo de movimentação da tocha  
ZTA - Zona Termicamente Afetada pelo Calor  
WAAM – *Wire and arc additive manufacturing*  
3D - Três dimensões  
ΔT – Variação de temperatura  
ΔX – Variação de comprimento

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
1.1	OBJETIVOS .....	16
1.1.1	<b>Objetivo Geral.....</b>	<b>16</b>
1.1.2	<b>Objetivos Específicos .....</b>	<b>16</b>
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>18</b>
2.1	PROCESSO DE SOLDAGEM PLASMA .....	18
2.2	TÉCNICAS DE ALIMENTAÇÃO DE ARAME E TRANSFERÊNCIA METÁLICA NO PROCESSO PLASMA .....	19
2.2.1	<b>Alimentação de arame contínua x dinâmica .....</b>	<b>19</b>
2.2.2	<b>Transferência metálica no processo plasma.....</b>	<b>26</b>
2.3	MANUFATURA ADITIVA VIA ARCO ELÉTRICO E ARAME (WAAM) .....	29
2.3.1	<b>Manufatura aditiva via processo de soldagem plasma.....</b>	<b>31</b>
2.3.2	<b>WAAM via plasma e a microestrutura dos metais.....</b>	<b>33</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>35</b>
3.1	MATERIAIS E EQUIPAMENTOS .....	36
3.1.1	<b>Bancada de ensaios .....</b>	<b>36</b>
3.1.2	<b>Corpos de prova e consumíveis de soldagem .....</b>	<b>40</b>
3.2	METODOLOGIA.....	41
3.2.1	<b>Preparação da bancada de ensaios.....</b>	<b>41</b>
3.2.2	<b>Definição dos parâmetros de soldagem.....</b>	<b>47</b>
3.2.3	<b>Depósito de cordão único sobre chapa.....</b>	<b>53</b>
3.2.4	<b>Construção das paredes .....</b>	<b>57</b>
3.2.5	<b>Análise das características elétricas, geométricas, térmicas e microestruturais dos cordões e paredes .....</b>	<b>59</b>
3.2.5.1	<i>Análise dos sinais elétricos.....</i>	<i>59</i>
3.2.5.2	<i>Análise geométrica .....</i>	<i>60</i>

3.2.5.3	<i>Análise das características térmicas</i> .....	63
3.2.5.4	<i>Análise da microestrutura das paredes</i> .....	64
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>66</b>
4.1	DEPÓSITO DE CORDÃO ÚNICO SOBRE CHAPA.....	66
4.1.1	<b>Análise dos sinais elétricos e estabilidade do processo</b> .....	<b>66</b>
4.1.2	<b>Análise geométrica</b> .....	<b>86</b>
4.1.3	<b>Análise térmica</b> .....	<b>92</b>
4.2	PAREDES .....	95
4.2.1	<b>Análise dos sinais elétricos e estabilidade do processo</b> .....	<b>95</b>
4.2.2	<b>Análise geométrica</b> .....	<b>98</b>
4.2.3	<b>Análise térmica</b> .....	<b>102</b>
4.2.4	<b>Análise da microestrutura</b> .....	<b>106</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>114</b>
5.1	CONCLUSÕES GERAIS.....	114
5.2	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	115
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>116</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A manufatura aditiva vem performando como uma tecnologia emergente na fabricação de componentes funcionais para sistemas mecânicos na indústria em geral. A manufatura aditiva com energia direcionada, em específico por processos de soldagem, tem ganhado espaço na indústria especialmente pela capacidade de produção de peças *just in time* e alta personalização tanto geométrica quanto física. Além disso, a grande diversidade de materiais e processos disponíveis para utilização abrem espaço para infinitas possibilidades de aplicação. É fato que as pesquisas no WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing) vêm crescendo, principalmente nas últimas três décadas, mas o uso da soldagem na fabricação de componentes de grande porte já é descrita em trabalhos mais antigos, sendo chamado de *shape welding*. No trabalho de Gnirss [1], é feita uma revisão bibliográfica sobre *shape welding*, relatando a construção de flanges e peças cilíndricas pelos processos de soldagem eletroescória e arco submerso em 1970, na Alemanha. No Brasil, Moraes, et al. [2], construíram integralmente um bocal para componentes nucleares utilizando o processo de arco submerso em 1986. Em trabalhos mais recentes como os de Jhavar et al (2014) [3], Feng et al. (2018) [4] e Ruft (2019) [5], diferentes tecnologias vem sendo aplicadas na manufatura aditivada via processo de soldagem, como por exemplo, micro plasma, plasma alimentado com duplo arame e múltiplas tochas, respectivamente.

No WAAM existem três processos de soldagem a arco que são amplamente utilizados como fonte de calor para a fusão do arame, MIG/MAG, TIG e Plasma [6]. O processo PAM (Plasma Additive Manufacturing) é usualmente utilizado na fabricação de componentes de alto custo, e por possuir bico constritor, apresenta a vantagem de maior densidade de energia o que resulta em maior taxa de deposição e melhor precisão de deposição em relação ao processo TIG convencional [7]. Além da constrição do arco, o bico também desempenha um papel de proteção do eletrodo, diminuindo o risco de contaminação por eventual instabilidade na transferência metálica quando o processo é alimentado.

Desta forma, com a crescente utilização do WAAM, é natural que exista a necessidade em desenvolver novas tecnologias na soldagem para melhorar o desempenho e qualidade dos processos. Neste contexto, diferentes técnicas de alimentação de arame vêm sendo desenvolvidas e estudadas para fornecer benefícios no processo de soldagem e no resultado das peças construídas via WAAM. Hoje, as tecnologias mais desenvolvidas utilizam técnicas de alimentação dinâmica ou pulsada de arame [8]. A alimentação dinâmica de arame

vem sendo estudada principalmente aplicada ao processo TIG e os autores relatam resultados promissores quanto à maior regularidade de potência [9], maior regularidade da transferência metálica e maior simetria da geometria dos cordões [10]. Além destas características, a utilização da alimentação dinâmica permite utilização de correntes mais baixas e menores velocidades de arame no processo devido ao maior controle da transferência metálica, favorecendo aplicações fora da posição plana de soldagem. Além dos atributos já citados a alimentação dinâmica promove a agitação da poça, que pode favorecer o refino de grão e dispersão de precipitados na microestrutura dos cordões soldados [10, 11].

O trabalho se propõe a explorar a utilização do processo plasma utilizando uma liga de aço inox 309L aliada à alimentação dinâmica de arame para aplicação na manufatura aditiva. Trabalhos sobre o tema são extremamente escassos na literatura e servirá como base para caracterização do processo, aplicabilidade, desafios e como contribuição de dados para trabalho futuros.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral é avaliar a influência do processo de soldagem plasma com alimentação dinâmica de arame nas características geométricas e metalúrgicas de cordões de solda depositados sobre chapa e de paredes construídas por manufatura aditiva em diferentes condições de alimentação, utilizando como material de adição arame de aço inox 309L. O foco será na comparação da estabilidade da transferência metálica, no comportamento térmico, na geometria do cordão e na microestrutura resultante da soldagem com os dois modos de alimentação de arame. Além disso, o trabalho tem como propósito discutir sobre a aplicabilidade da alimentação dinâmica na Manufatura Aditiva via processo plasma.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

Para atingir o objetivo geral, alguns objetivos específicos foram traçados:

- Preparar e adequar todos os elementos da bancada de trabalho do processo plasma, como: fonte de soldagem, direcionador de arame e manipulador robótico para a aplicação na Manufatura Aditiva com alimentação de arame contínua e dinâmica;

- Caracterizar e avaliar o comportamento da alimentação contínua e dinâmica de arame em diferentes frequências quanto à estabilidade do processo de soldagem por meio da aquisição de sinais elétricos, perfil de distribuição térmico e dinâmica de movimento do arame através da filmagem em alta velocidade;

- Avaliar a influência de diferentes frequências de oscilação do arame sobre a transferência metálica e sobre as características geométricas e térmicas de cordões de solda depositados sobre chapa;

- Avaliar os ciclos térmicos resultantes da soldagem com alimentação contínua e dinâmica de arame durante a construção das paredes com o processo plasma;

- Avaliar a influência da alimentação dinâmica sobre a microestrutura das paredes com os dois modos de alimentação de arames;

- Avaliar a influência da alimentação dinâmica na dureza das paredes construídas;

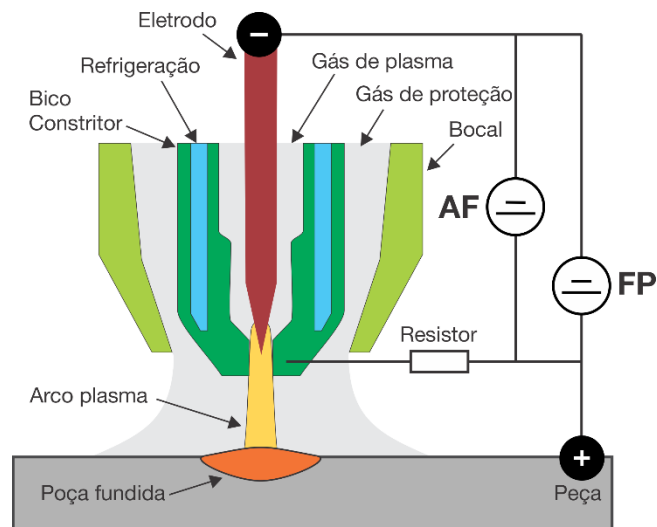
- Avaliar a homogeneidade da composição química no sentido longitudinal da parede para os dois modos de alimentação de arame através da análise de espectrometria óptica.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 PROCESSO DE SOLDAGEM PLASMA

O processo de soldagem plasma ou *plasma arc welding* (PAW) pode ser definido como um processo de soldagem de fusão e união de metais a partir do aquecimento gerado por um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo, geralmente de tungstênio, e um substrato. Surgiu como uma variação do processo de soldagem TIG (*Tungsten Inert Gas welding*) e se assemelha pelo fato de usar um eletrodo não consumível para estabelecer um arco elétrico com a peça ao mesmo tempo em que protege o material em fusão por fluxo de gás inerte através do bocal [12]. A principal diferença entre os dois processos está na construção da tocha, uma vez que no processo plasma o arco é constricto pelo bico constritor, conforme é mostrado na Figura 1. Gás inerte, geralmente argônio puro, é transportado através do orifício interno ao redor do eletrodo de tungstênio chamado de gás de plasma. Dessa forma, para iniciar um arco do processo plasma, primeiramente uma baixa corrente (suficiente para manter um arco entre o bico e o eletrodo) é imposta entre o eletrodo de tungstênio e o bico constritor, ionizando o gás de plasma que flui através do orifício constritor dando origem ao arco piloto, também conhecido como arco não transferido. O gás de plasma ionizado atinge temperaturas muito altas fornecendo um caminho para iniciar o arco principal, também conhecido como arco transferido, entre o eletrodo e a peça de trabalho. [12]

Figura 1. Esquemático ilustrativo do bocal da tocha plasma.





## 2.2 TÉCNICAS DE ALIMENTAÇÃO DE ARAME E TRANSFERÊNCIA METÁLICA NO PROCESSO PLASMA

Uma das particularidades do processo Plasma e TIG em relação aos processos MIG/MAG e Eletrodo Revestido é a utilização de um eletrodo de tungstênio não consumível que possibilita realizar a soldagem sem a adição de material, ou seja, de modo autógeno. Apesar de a soldagem autógena possuir a vantagem de maior disponibilização de energia à poça de soldagem, sem absorção de calor por parte do arame ou do pó, algumas aplicações do processo podem demandar o emprego de adição de material [3]. O preenchimento de uma junta ou aplicações de Manufatura Aditiva (MA) constituem algumas das justificativas.

Diversas técnicas de alimentação foram desenvolvidas ao longo das décadas para atender as mais diversas aplicações, podendo ser efetuadas por meios manuais ou automáticos. As vertentes de pesquisa diferem em relação à temperatura do arame, à sua disposição geométrica e ao seu modo de movimentação, podendo também haver a combinação de diferentes estratégias com o intuito de conciliar seus benefícios [13]. Com o objetivo de aplicação na Manufatura Aditiva, especificamente na investigação da alimentação dinâmica de arame, serão abordadas nos tópicos abaixo apenas as técnicas de alimentação que dizem respeito ao modo de alimentação de arame. Vale ressaltar que a terminologia utilizada não é consolidada globalmente, sendo então uma sugestão para definição das técnicas discutidas.

### 2.2.1 Alimentação de arame contínua x dinâmica

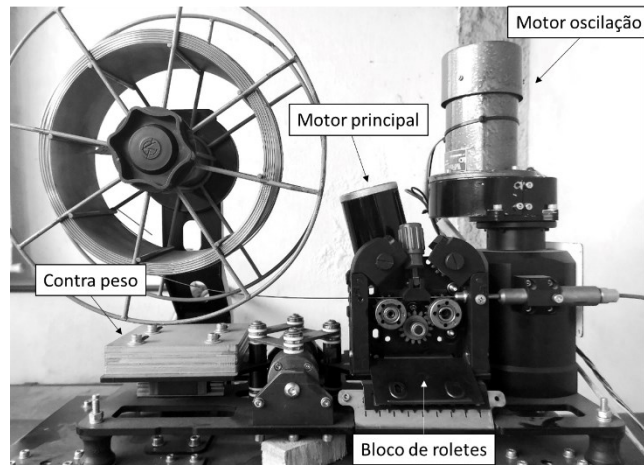
Na soldagem, entende-se por alimentação contínua de arame aquela em que durante todo o processo possui velocidade de arame constante e definida pelo operador. É o modo de alimentação convencional adotado nos equipamentos comerciais devido à relativa simplicidade de equipamento e controle quando comparado aos modos de alimentação dinâmica. No que diz respeito à nomenclatura, “alimentação contínua” é ampla e mundialmente utilizada. Em 1982 Rudy [14], já empregava esta terminologia para se referir ao modo de alimentação convencional em que a velocidade de alimentação é constante. Em trabalhos mais recentes, como os de Silva [15] e Foley [11] a utilização do termo alimentação contínua também é usada para se referir à alimentação de arame convencional.

Já o conceito de Alimentação Dinâmica de arame, abrange toda forma de alimentação não constante de material, isto é, na alimentação dinâmica pressupõe-se variações no movimento/deslocamento do arame que está sendo alimentado. Silva et al [15] definiram Alimentação Dinâmica como sendo o movimento de avanço e recuo do arame aplicado ao alimentador por um sistema eletromecânico, que gera características como aumento da robustez do processo e transferência metálica mais suave. Já Jorge et al. [16] chamaram de alimentação pulsada a modalidade em que o arame realiza o movimento de avanço e retrocesso durante o processo. Para Santangelo et al. [17] a técnica de excitação do arame a uma frequência definida é chamada de vibração. No presente trabalho será adotada a nomenclatura “dinâmica”, para se referir às técnicas de alimentação de arame não contínua.

As variações do movimento tangem a mudanças no sentido de deslocamento do arame e alterações na velocidade de alimentação de arame, sendo assim, podemos classificar a alimentação dinâmica em duas variantes: Alimentação Dinâmica Oscilante e Alimentação Dinâmica Pulsada.

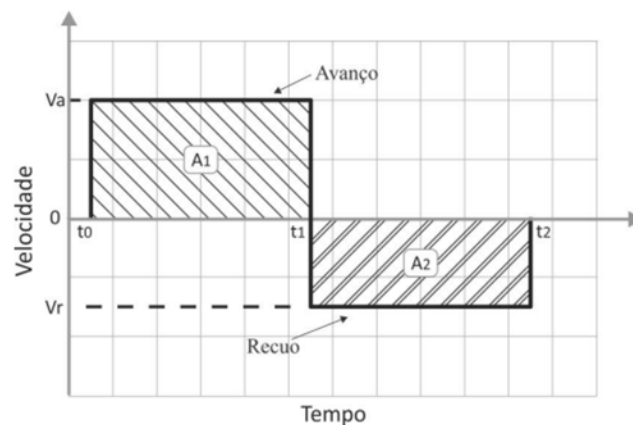
**Alimentação Dinâmica Oscilante** - Na alimentação oscilante ocorre a alternância do sentido de alimentação, com amplitude e frequência definidas, na direção do eixo do arame. Nos equipamentos encontrados comercialmente e desenvolvidos no Labsolda, a alimentação de arame pelo motor principal é mantida constante ( $V_a$  regulada na fonte de soldagem) e a oscilação do movimento é provocada pelo deslocamento do bloco de rolete, modificando assim a velocidade relativa de alimentação de arame. A Figura 2 apresenta o Módulo de Alimentação Dinâmica (MAD), desenvolvido pelo Labsolda.

Figura 2. Esquemático do Módulo de Alimentação Dinâmica indicando os principais componentes.



A dinâmica de movimentação oscilante ideal do arame é apresentada na Figura 2, nela o comportamento é definido por uma onda quadrada onde a inversão de sentido (avanço e recuo) ocorre instantaneamente. A Figura 3 mostra uma onda quadrada de movimento oscilante do arame, que traduz o movimento ideal de um período de avanço e um período de retrocesso de arame.

Figura 3. Representação da dinâmica de movimentação de arame ideal no modo oscilante. [13]



[13]

Quatro variáveis governam o movimento do arame, o tempo de avanço ( $t_a$ ), calculado por  $t_1 - t_0$ , tempo de recuo ( $t_r$ ), calculado por  $t_2 - t_1$ , velocidade de avanço ( $V_a$ ) e velocidade de recuo ( $V_r$ ). Para que a velocidade resultante seja positiva a velocidade de avanço deve ser

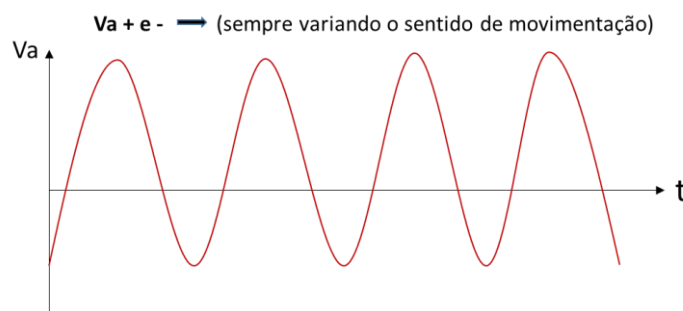
superior à de recuo. A área abaixo do gráfico indica o deslocamento do arame que avança ( $A_1$ ) e que recua ( $A_2$ ). Matematicamente, o deslocamento é determinado segundo a relação apresentada na equação abaixo [18], onde  $V(t)$  corresponde à função velocidade.

$$\text{Deslocamento} = \int_{t_0}^{t_2} v(t) dt = A_1 - A_2 \quad (1)$$

É possível calcular a velocidade média resultante dividindo-se o deslocamento resultante ( $A_1 - A_2$ ) pelo tempo total ( $t_2 - t_0$ ).

O movimento real da alimentação dinâmica se assemelha mais a uma curva senoidal, em que existem rampas de aceleração e desaceleração do arame intercaladas com momentos em que a velocidade é igual a zero antes da inversão do sentido de movimento, ou seja, a inversão de movimento não ocorre instantaneamente. A razão desse comportamento pode ser atribuída a própria física do movimento somado aos efeitos de atrito e folgas presentes no sistema. Além disso, o arame para nos pontos de inversão de sentido, atingindo velocidade zero de arame. A Figura 4 apresenta o comportamento do arame na alimentação dinâmica oscilante.

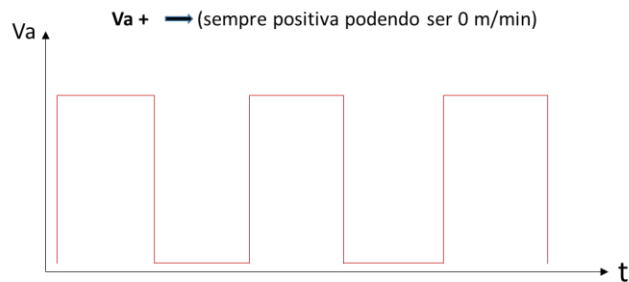
Figura 4. Gráfico ilustrativo do comportamento da velocidade de arame ao longo do tempo na alimentação dinâmica oscilante.



**Alimentação Dinâmica Pulsada** - Na alimentação pulsada a velocidade de alimentação é sempre positiva, isto é, sempre no sentido de aproximação da poça/arco, porém com valores variados em períodos pré-definidos, caracterizando uma onda pulsada com dois patamares de velocidade de arame regulados. Ressalta-se que os sinais positivo e negativo para velocidade do arame foram definidos por convenção. Assim sendo, a velocidade negativa trata-se do período em que o arame apresenta o movimento de recuo, afastando-se da poça. A

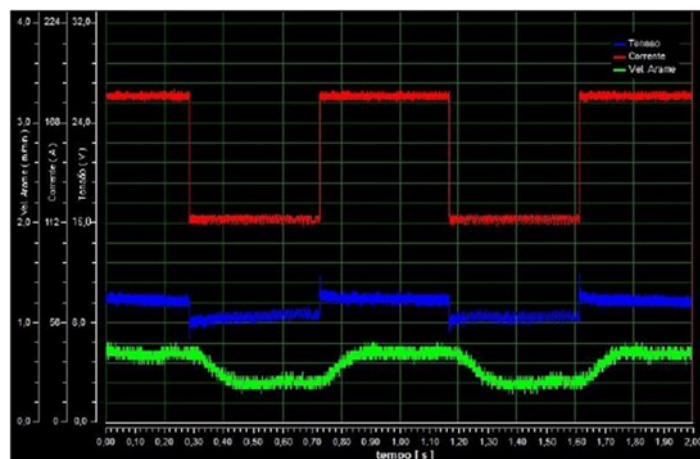
Figura 5 apresenta o gráfico ilustrativo do comportamento ideal da velocidade de arame ao longo do tempo na alimentação pulsada.

Figura 5. Gráfico ilustrativo do comportamento da velocidade de arame ao longo do tempo na alimentação dinâmica pulsada.



A alimentação pulsada foi utilizada no trabalho de Pigozzo [19] na soldagem orbital de passe de raiz com o processo TIG, conciliando patamares mais elevados de velocidade com pulsos de corrente, enquanto as velocidades mais baixas foram desenhadas para acompanhar os momentos de corrente de base do processo. A Figura 6 ilustra um oscilograma real do comportamento da alimentação dinâmica pulsada obtida por Pigozzo [19].

Figura 6. Oscilograma de corrente, tensão e velocidade de arame pulsada no processo TIG.



[19]

Os estudos com foco em técnicas avançadas de alimentação de arame no processo plasma ainda são escassos, sendo que a grande maioria das publicações são de aplicações no processo TIG. A ideia de alimentar arame de forma dinâmica já foi estudada em 1982 em uma

das primeiras publicações sobre alimentação dinâmica automatizada. Rudy [14] desenvolveu modificações mecânicas e eletrônicas em seu sistema de soldagem TIG para a realização da movimentação do arame com frequências entre 3 e 11 Hz. O objetivo era obter um melhor controle da transferência metálica, evitando a formação de gotas com tamanho e comportamento imprevisíveis, para o reparo de partes pequenas pertencentes a um motor de avião. Rudy concluiu que o aumento da velocidade de aproximação do arame de forma controlada gerava uma transferência metálica muito mais estável, com tamanho de poça controlado, diminuindo a tendência de escorrimto de material pela lateral das partes a serem reparadas. Esse novo modo de alimentação de arame foi batizado por ele de “Dabber TIG”.

Nos últimos anos novas abordagens têm sido estudadas no que diz respeito a alimentação dinâmica. Riffel et al. [10] avaliaram os efeitos da alimentação dinâmica sobre a geometria do cordão na soldagem TIG e concluíram que o arame quando alimentado a uma frequência de 18 Hz resulta em cordões de solda com menor diluição e penetração, em comparação com alimentação contínua em ponte. Silwal e Santangelo [20], usando frequências em torno de 16 Hz, relataram que o uso de “vibração no arame” forneceu uma força extra auxiliando na transferência metálica e diminuindo o tempo de destacamento da gota, porém nenhuma diferença significativa foi constatada na geometria dos cordões. Já na investigação de Jorge et al. [16] na soldagem TIG com alimentação dinâmica com frequência de 15 Hz, houve um aumento de mais de 40% na penetração quando comparado com a alimentação contínua intermitente, mesmo apresentando potência média cerca de 100 W menor.

Segundo Riffel [21], em seu estudo com o processo TIG, durante o movimento de avanço o arame percorre as isotermas do arco elétrico com maior velocidade, evitando a formação de grandes gotas em sua ponta, o que gera uma maior robustez para soldagem fora de posição. A estabilidade e robustez do processo com alimentação dinâmica também foram observadas por Silva et al. [9], que demonstraram através de oscilogramas de tensão do arco, tensão do arame e corrente que os resultados da alimentação dinâmica em 18 Hz geraram uma transferência metálica e valores de potência média mais regulares do que os encontrados na alimentação contínua no processo TIG. A mesma técnica foi aplicada por Silva et al. [22] em uma frequência de 1,25 Hz, o objetivo era unir tubos de aço para a indústria de óleo e gás, os autores também mostraram a possibilidade de aumentar a produtividade na execução do passe de raiz para uma soldagem automatizada.

Alguns autores [5, 11, 16] estudaram também a relação entre a alimentação dinâmica e consequente aumento da agitação da poça de fusão com a temperatura e como isso pode, de alguma forma influenciar na microestrutura dos cordões soldados.

Jorge et al. [23] investigaram a alimentação dinâmica no processo MIG/MAG e embora não tenham encontrado diferenças na geometria dos cordões, constataram mudança no perfil térmico próximo à região da poça. Houve menor transferência de calor para a peça na soldagem com frequência de 16 Hz resultando em uma redução da área de grãos grosseiros na ZTA e uma microestrutura mais refinada.

Neves et al. [24] investigaram a influência da alimentação dinâmica em diferentes frequências (0,5, 5, 10 e 15 Hz) na resistência à fadiga de soldas realizadas pelo processo TIG quando comparado com alimentação contínua de arame. Os cordões soldados com alimentação dinâmica apresentaram em sua microestrutura dendritas com menor espaçamento entre os braços secundários e maiores valores de microdureza do que os obtidos na alimentação contínua. Os autores atribuem esses resultados como provável justificativa para o aumento da resistência à fadiga encontrado nas amostras soldadas com alimentação dinâmica.

Riffel [10] mostrou que a alimentação dinâmica provocou uma melhor distribuição dos precipitados, formando uma estrutura mais isotrópica em procedimentos de revestimento com Inconel 625. Além disso, houve refino de grão na soldagem realizada com 18 Hz que resultou em aumento da resistência à corrosão do revestimento nas condições estudadas.

Em artigos publicados pela equipe do Labsolda, a alimentação dinâmica com transferência em ponte intermitente apresentou potência média maior que para a alimentação convencional [9]. Em contrapartida, estudos termográficos realizados com câmeras infravermelho mostraram que a alimentação dinâmica de material reduz a temperatura da poça metálica. Vale ressaltar que a temperatura foi monitorada pelo verso da chapa. [15].

Os equipamentos disponíveis no mercado permitem uma oscilação de até 16 Hz (TigSpeed [25]), 15 Hz (TIP TIG [26] e 10 Hz (Dabber TIG [27]) [3]. O equipamento utilizado no presente trabalho foi desenvolvido pelo Labsolda, e é denominado MAD – Módulo de Alimentação Dinâmica, e permite operar em frequências entre 0,5 e 20 Hz, informações complementares serão fornecidas na seção 3.1.1.

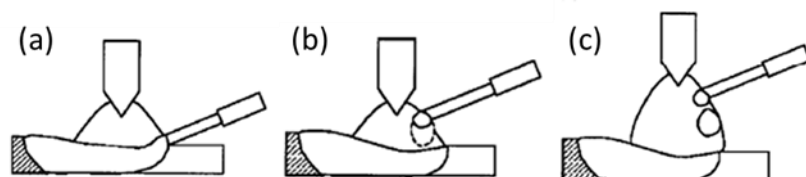
### 2.2.2 Transferência metálica no processo plasma

Quando falamos em soldagem plasma com alimentação de arame, torna-se necessária uma análise dos possíveis modos de transferência metálica presentes no processo.

O modo de transferência metálica está diretamente ligado à técnica de alimentação de arame, porém uma não define a outra. É possível estabelecer modos de transferência iguais para técnicas de alimentação diferentes. Sendo assim, a transferência metálica está intimamente ligada a diferentes combinações de velocidade de alimentação de arame, posição de alimentação de arame, distância bico constritor-peça, corrente e vazão de gás de plasma [28-31]

Assim sendo, pode-se distinguir três principais modos de transferência, sendo eles: transferência em ponte contínua, onde o contato entre arame e poça metálica é constante em ponte metálica, transferência em ponte intermitente, onde a ponte metálica é rompida e estabelecida periodicamente em ciclos definidos e a transferência em gota grosseira, ou voo livre [32], ou ainda definido por Jun et al. [33] simplesmente como transferência em gota, onde ocorre a formação de uma gota na ponta do arame a qual é transferida muito rapidamente, sem que perdure uma ponte metálica, por tensão superficial. Esta última sendo na maioria das aplicações indesejável por apresentar uma transferência irregular, aleatória e de gotas grosseiras. Algumas gotas formadas são transferidas para a poça, mas outras tornam-se respingos e são expelidas para fora da solda. A diferenciação entre ponte intermitente e gota grosseira é a duração do contato entre arame e poça, sendo que a transferência em ponte este período é muito maior que para a transferência em gota. A Figura 7 apresenta um esquemático do processo TIG com os três tipos de transferência encontrados, vale ressaltar que existem semelhanças entre os processos TIG e Plasma e a transferência metálica ocorre de forma similar.

Figura 7. Ilustração esquemática dos modos de transferência metálica. (a) Ponte contínua (b) Ponte intermitente (c) Gota intermitente.



Adaptado de [32].



Para uma mesma energia e condições de soldagem, o excesso de arame pode resultar em fusão incompleta do mesmo e conseqüentemente defeitos no cordão de solda. Por outro lado, uma velocidade de alimentação insuficiente promove a formação de gotas acarretando uma transferência de gota intermitente, ou seja, a taxa de fusão excede a taxa de alimentação de arame, impedindo que o mesmo chegue à poça, gerando um crescimento acentuado da gota e um destacamento com auxílio da força gravitacional. Para que ocorra a transferência em ponte contínua é necessário que haja um equilíbrio entre a energia do sistema responsável pela fusão do arame e a velocidade de arame que está sendo alimentada no processo.

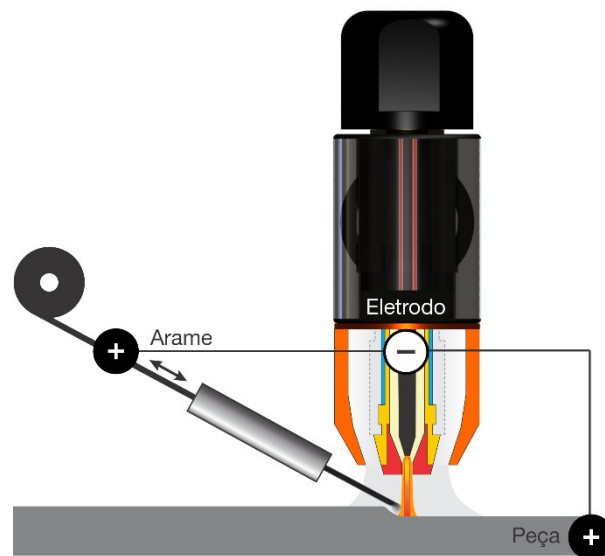
Jun et al. [33] avaliaram a transferência metálica no processo TIG para diferentes alturas entre a ponta do arame e a poça de fusão. Com altura de 0 mm o modo de transferência promovido foi o de ponte contínua, que resultou em um cordão uniforme e com ausência de respingos. Ao aumentar a altura para 2 mm o modo de transferência foi alterado para ponte intermitente, alternando em ciclos regulares momentos em ponte e momentos em intermitência. A última altura estudada foi a de 4 mm em que o modo de transferência novamente foi alterado, apresentando características de transferência de gota intermitente, ocorrendo formação de gotas grandes, transferência irregular e respingos. A grande influência da altura de alimentação do arame foi constatada nos ensaios realizados no presente trabalho, com mudança no modo de transferência metálica de ponte contínua para ponte intermitente ao variar apenas 1 mm a altura. Uma possível justificativa para a maior sensibilidade do processo plasma é a maior concentração de calor do arco constrito em relação ao processo TIG.

Os modos de transferência em questão apresentam características que podem favorecer ou não o processo de soldagem, dependendo da sua aplicação. A transferência em ponte contínua apresenta benefícios quanto à estabilidade de transferência e ausência de respingos, e é preferencialmente utilizada na maioria das aplicações. A ausência de formação de gotas diminui o risco de contaminação do eletrodo no processo TIG e permite a soldagem na posição sobre cabeça [34]. Neste caso, a tensão superficial atua de maneira a minimizar a possibilidade de escorrimento, sustentando a poça, o que torna o procedimento menos instável [35]. Porém, para que haja a transferência em ponte contínua o equilíbrio entre a velocidade de arame e a potência do processo deve ser respeitada, o que limita a janela de operação. Uma alternativa para essa restrição é a utilização do modo ponte intermitente controlado pela alimentação dinâmica, que permite maior flexibilidade na escolha da taxa de material necessária para a aplicação. Riffel et al. [22] obtiveram um aumento na produtividade e velocidade de soldagem utilizando alimentação dinâmica e transferência em ponte

intermitente em sua aplicação na soldagem orbital de passe de raiz em relação à ponte contínua.

O estudo dos modos de transferência metálica também auxilia na avaliação da estabilidade do processo e na interpretação e possíveis defeitos no cordão de solda. No que tange às formas de monitoramento da alimentação de material, uma maneira bastante simples e eficiente é a aquisição do sinal de tensão entre arame e eletrodo uma vez que o arame se encontra energizado quando em contato com a poça metálica ou apenas dentro de uma região do arco ionizado. Assim sendo, é possível identificar os períodos em ponte metálica e caracterizar a uniformidade/periodicidade da transferência. A Figura 8 apresenta o esquemático da conexão do sistema de medição da tensão (SAP) entre o eletrodo e o arame e entre o eletrodo e a peça.

Figura 8. Esquemático da conexão do sistema de medição da tensão entre o eletrodo e a peça e entre o eletrodo e o arame.



Um efeito decorrente da intermitência da transferência metálica, seja em ponte ou em gotas, é que durante os períodos em ponte, o ancoramento do arco se dá sobre parte do arame, reduzindo o comprimento do arco e conseqüentemente, a tensão do arco. A Figura 9 apresenta os oscilogramas de uma alimentação contínua com transferência em ponte contínua (a) e alimentação dinâmica em ponte intermitente (b). A Figura 10 apresenta um oscilograma de uma alimentação contínua em gota intermitente, no qual é possível identificar a instabilidade de transferência.

Figura 9. Oscilogramas referentes ao modo de transferência metálica (a) por ponte contínua e (b) ponte intermitente.

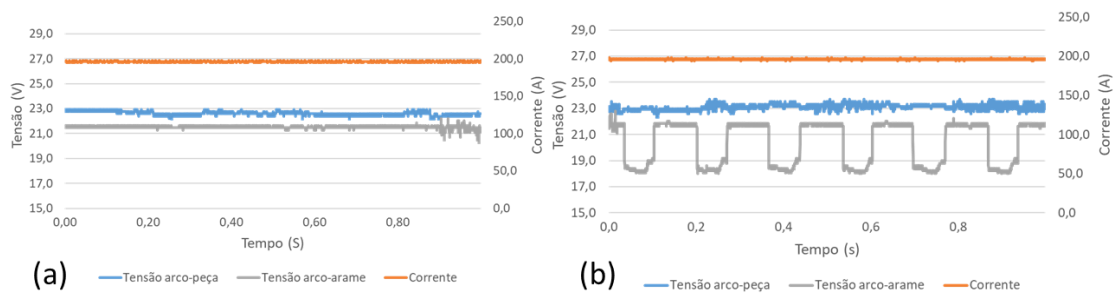
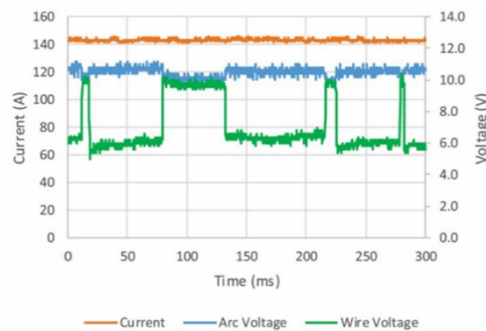


Figura 10. Oscilograma referente ao modo de transferência metálica por gota intermitente, evidenciando o comportamento instável.



[9]

### 2.3 MANUFATURA ADITIVA VIA ARCO ELÉTRICO E ARAME (WAAM)

A Manufatura Aditiva (MA) é definida pela norma ABNT NBR ISO/ASTM 52900:2018 como uma técnica de fabricação na qual se tem a conversão de um desenho 3D (CAD) em uma peça física por meio de deposição camada a camada, através de um fatiamento prévio. Dentro desse contexto, os processos de manufatura aditiva assistidos por técnicas de soldagem, também denominados de WAAM (*Wire Arc Additive Manufacturing*), visam a obtenção de modelos físicos funcionais, ou seja, peças que possam ser utilizadas como elementos de máquina em sistemas técnicos, em sua forma final (*net shape*) ou semi-final (*near net shape*)[36].

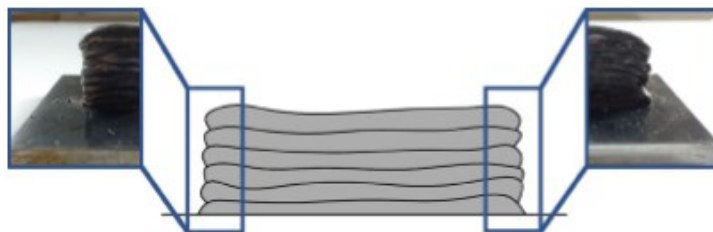
A utilização do WAAM vem se difundindo industrialmente, principalmente no setor aeroespacial, devido às vantagens que o processo oferece que se concentram principalmente em redução do tempo de produção global das peças, baixo custo de implantação, ampla

disponibilidade de arames (composição química), baixo fator BTF (*Buy-to-fly*)<sup>1</sup> e pela qualidade obtida. Além disso, as características do processo, tais como alta taxa de deposição e alta eficiência energética possibilitam a fabricação de peças grandes com moderada complexidade. Todos esses fatores tornam o WAAM um processo de fabricação competitivo frente aos processos tradicionais como fundição e forjamento, por exemplo, mas ainda existem alguns desafios técnicos a serem resolvidos e/ou aprimorados.

Segundo Ding, et al. [37], o controle de tensões residuais e distorções, especialmente na construção de peças grandes, é uma das principais preocupações, pois não só afeta a tolerância dimensional das peças, mas também causa falhas prematuras. Na soldagem, as altas taxas de aquecimento e resfriamento induzem tensões devido à expansão e contração não uniformes do material, acarretando a distorção da estrutura do componente.

Outro desafio do WAAM, devido às características inerentes ao processo de soldagem, é manter a uniformidade da geometria do cordão, principalmente nas partes inicial e final, como pode ser visto na Figura 11. Esse efeito pode acumular erros à medida que outras camadas são depositadas resultando não só em uma geometria desigual, mas também em um acabamento superficial ruim e baixa precisão dimensional das peças. Dessa forma, alguns parâmetros devem ser cuidadosamente especificados para evitar desvios dimensionais, como a energia do processo, velocidade de deslocamento, largura do cordão, espessura da camada, diâmetro do arame-eletrodo e taxa de alimentação, além do planejamento da estratégia de deposição (padrão de deposição e sequências).

Figura 11. Variação na geometria das extremidades da parede construída por WAAM.



[38]

---

<sup>1</sup> Razão do peso inicial da matéria prima e o peso da peça final, essa relação foi definida a fim de verificar o consumo de material. Valores próximos de 1 representam consumos baixos de matéria prima.

De maneira geral, processos como MIG/MAG, TIG e Plasma têm sido aplicados para manufatura aditiva de componentes de aço, alumínio, superligas de níquel e ligas de titânio [29].

### 2.3.1 Manufatura aditiva via processo de soldagem plasma

A Manufatura Aditiva via processo plasma ou *plasma arc additive manufacturing* (PAM), como o próprio nome sugere, é a modalidade onde o arco do processo de soldagem plasma é utilizado como fonte de calor para a fusão de arame ou pó em aplicações na Manufatura Aditiva. A maioria dos estudos encontrados na literatura sobre o processo plasma são focados na aplicação pela técnica *keyhole*, mas a alta penetração e a formação de *keyhole* são indesejadas no processo WAAM. Essas características induzem fluidez excessiva que é prejudicial à deposição de camadas e apresentam potencial para formação de defeitos [39]. Portanto, modificações apropriadas devem ser feitas no arranjo experimental, em particular nas configurações da tocha e pressão do arco para aplicação na manufatura aditiva.

Diferentemente do WAAM com processo MIG/MAG, na manufatura aditiva com os processos TIG e Plasma o arame não é alimentado coaxialmente, necessitando de um sistema de alimentação externa. Essa característica induz variações em parâmetros essenciais do processo ao ser mudada a orientação da tocha, por exemplo, conferindo extrema sensibilidade no comprimento do arco. Dessa forma, muitos sistemas de soldagem automatizados requerem um eixo rotativo para orientar o direcionador de arame e mantê-lo alinhado com a direção de soldagem, limitando sua aplicabilidade [6]. Por outro lado, a independência entre a energia do processo e a taxa de alimentação tornam o TIG e o Plasma processos mais flexíveis quanto à combinação desses parâmetros. Até agora, as tecnologias de soldagem TIG e Plasma demonstraram ser processos mais confiáveis para WAAM com menos problemas de respingos, aquecimento excessivo, distorção ou porosidade do que o processo MIG/MAG convencional [6]. Porém, novas versões dos processos vêm sendo utilizadas para minimizar os problemas na manufatura aditiva, por exemplo a versão do MIG/MAG conhecida como CMT (*Cold Metal Transfer*) da fabricante Fronius, que diminui o aporte térmico e as distorções na soldagem.

Pesquisas com PAM vem assumindo mais espaço devido ao seu grande potencial em melhorar a eficiência, conveniência e economia de custos em comparação com os processos

de alta energia como laser (*Laser Beam Deposition* – LBD) e feixe de elétrons (*Electron Beam Melting* - EBM)[7], principalmente na fabricação de componentes estruturais de alto custo, como discos e pás de turbinas de aeronaves, que normalmente são produzidos com ligas de titânio.

Em comparação com a manufatura aditiva com TIG, o plasma tem as vantagens de um arco mais concentrado, com maior densidade de energia e rigidez e conseqüentemente maior precisão de deposição [4]. Segundo Lin et al. [7], a temperatura no centro do arco de plasma pode atingir cerca de 10.000 -16.000 K, tornando a densidade de energia do arco plasma muito maior do que a do TIG e próximo ao limite inferior do laser, o que ajuda na deposição mais precisa de material em relação ao processo TIG. Para Bai et al. [39] e Lin et al. [7], o processo plasma é uma alternativa bastante interessante na deposição de ligas de titânio, devido à densidade de energia, que leva a uma taxa de deposição mais alta e a menor rugosidade da superfície em relação ao TIG.

Além disso o plasma pode apresentar maior produtividade devido à existência do arco piloto. No TIG a abertura do arco é realizada por toque ou por pulso de alta frequência, sendo necessária a reigitação do arco a cada novo cordão depositado caso haja necessidade de tempo de parada entre cordões. Já no processo plasma, a manutenção do arco piloto entre passes torna mais simples a ignição do arco transferido, diminuindo o desgaste e os riscos de contaminação do eletrodo devido à presença do bico constritor.

Diante das características apresentadas pelo processo plasma aplicado ao WAAM, diversos estudos foram conduzidos explorando diferentes aplicações e materiais. No estudo de Lin et al. [40] foi investigada a manufatura de paredes finas (cordão simples), utilizando titânio (Ti-6Al-4V) com o processo PAW pulsado e controlando o aporte térmico camada a camada. Com esta redução de aporte térmico, a microestrutura das paredes foi refinada. A tensão de escoamento média e a resistência à tração atingiram o valor de 909 MPa e 988 MPa respectivamente, e o alongamento atingiu cerca de 7,5%. As peças, segundo os autores, apresentaram excelente desempenho para aplicações aeronáuticas, onde são requeridos elevados valores de propriedades mecânicas.

Em seus experimentos Bai et al. [39], criaram um modelo matemático para simular e investigar o comportamento da transferência térmica e do fluxo de fluido na deposição multicamadas utilizado PAW e alimentação de arame de titânio (Ti-6Al-4V). Junto disto, os dados simulados foram utilizados como base para parametrização da deposição prática de metal. Os perfis simulados e as dimensões dos cordões depositados e da poça fundida foram

validados utilizando a aparência das soldas experimentais, imagens de seção transversal e imagens de captadas durante o processo. Os resultados simulados foram de acordo com os resultados experimentais.

Jhavar et al. [3] descreveram a fabricação de componentes de aço ferramenta P20 usando o processo WAAM por microplasma. Martina et al. [41] estudaram o uso de um sistema de deposição de arame com plasma para fabricar componentes aeroespaciais de grande porte com liga de Ti-6Al-4V. Este trabalho incluiu um modelo matemático para calcular a largura efetiva da parede, altura da camada e os parâmetros de processo mais adequados. Xu et al. [42] investigaram o efeito dos parâmetros do processo plasma com corrente pulsada na precisão da manufatura de componentes de paredes finas. Feng et al. [4] analisaram a utilização de duplo arame na manufatura aditiva via plasma com aço inoxidável e concluíram que houve um aumento na taxa de deposição para os mesmos parâmetros de soldagem.

### **2.3.2 WAAM via plasma e a microestrutura dos metais**

Os comportamentos termofísicos do processo WAAM são mais complexos do que os da soldagem a arco convencional porque as condições de deposição variam a cada camada em termos de histórico de temperatura, condição de resfriamento e morfologia da superfície da base [39]. Todas essas condições influenciam diretamente na microestrutura resultante da peça soldada, na nucleação e no crescimento de grãos [7, 43]. No que se refere ao processo plasma, devido à elevada complexidade do arco constrito, os estudos acerca de modelos numéricos para simular a transferência de calor e o fluxo de fluidos na manufatura aditiva ainda são limitados. Porém, a microestrutura resultante do processo vem sendo alvo de estudo para diferentes materiais, principalmente para ligas de titânio, de níquel e os aços inoxidáveis.

Em seus estudos Lin et al. [7, 40, 44] utilizaram o processo plasma pulsado como uma alternativa para resolver o problema de heterogeneidade microestrutural que acomete as ligas de titânio na manufatura aditiva com processos de alta densidade de energia, como laser e feixe de elétrons. Essa heterogeneidade pode resultar na anisotropia das propriedades mecânicas da peça, especialmente baixa ductilidade. Os resultados obtidos foram satisfatórios, atingindo a homogeneidade da microestrutura e o refino dos grãos de titânio  $\alpha$  que promoveram valores de tensão limite de escoamento e resistência à tração superiores aos encontrados nas peças fabricadas por forjamento.

Wang et al. [45] avaliaram a evolução da microestrutura e das propriedades mecânicas do Inconel 718 na fabricação de paredes finas pelo processo plasma. Como resultado dos inúmeros ciclos térmicos sofridos pela parede no processo WAAM, foram gerados diferentes gradientes de temperatura e taxas de crescimento de grãos. Ao contrário da microestrutura obtida em componentes construídos por laser ou feixe de elétrons, os fabricados pelo plasma não contêm apenas estrutura de dendritas colunares, mas também exibem dendritas celulares e equiaxiais, melhorando as propriedades mecânicas.

Veiga et al. [46] compararam a tecnologia WAAM com o processo plasma e o processo MIG/MAG na construção de paredes espessas de liga de níquel (FeNi36). Esta comparação foi baseada na análise da geometria das paredes, metalografia e propriedades mecânicas do material produzido por ambas as tecnologias. Os resultados mostram um substancial aumento na tenacidade e alongamento antes da fratura e piora na resistência à tração no caso do plasma, com valores médios de 475 MPa para resistência à tração, 40% para alongamento enquanto os valores médios encontrados no MIG/MAG foram de 485 MPa e 31%.

Em seu trabalho Foley [11] analisou a influência da alimentação dinâmica na microestrutura do aço inoxidável 308 na manufatura aditiva via processo plasma quando comparado à alimentação contínua. O modo de alimentação dinâmica resultou em características microestruturais mais refinadas com morfologia e orientações de crescimento de grão altamente variadas a nível de sub-grão. Porém em macroescala a alimentação dinâmica ainda resultou em grãos colunares longos e orientados verticalmente que podem prejudicar a resistência à fadiga.

A solidificação dos processos de soldagem por fusão é dominada pelo crescimento competitivo de grãos colunares e não favorece geralmente o crescimento equiaxial de grãos, além dos que se formam em uma quantidade relativamente pequena nas linhas de fusão. Para a maioria das aplicações, os grãos finos e equiaxiais são preferíveis, pois resultam, no geral, em maior tenacidade e resistência à corrosão. No entanto, em WAAM, o mais comum é que a microestrutura resultante seja a de grandes grãos colunares ao longo das camadas, resultado do crescimento competitivo dos grãos, podendo causar anisotropia no produto final [11, 47]. Por esse motivo também é que novas tecnologias de modificação e aprimoramento do processo, como a alimentação dinâmica por exemplo, vem sendo estudadas.



### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente tópico aborda a metodologia adotada para atender aos objetivos propostos na realização deste trabalho, assim como os materiais e equipamentos utilizados. A metodologia foi desenvolvida em duas frentes, uma referente à soldagem de cordões simples sobre chapa e a outra focada na construção das paredes. Para tornar isso possível, anteriormente houve a etapa de preparação da bancada experimental e a etapa de definição dos parâmetros de soldagem. As etapas posteriores à soldagem dos cordões e das paredes consistiram na análise geométrica, análise dos sinais elétricos e análise térmica. Além disso, as paredes passaram por uma etapa a mais, a de análise microestrutural. Em todas as etapas os resultados foram analisados sempre comparando os efeitos das diferentes frequências alvo de estudo deste trabalho. De modo a auxiliar a compreensão da metodologia aplicada, as principais etapas são descritas no fluxograma ilustrado na Figura 12.

Figura 12. Fluxograma ilustrativo da metodologia de ensaios e análises aplicados.



## 3.1 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

### 3.1.1 Bancada de ensaios

Os ensaios de soldagem dos cordões e das paredes foram realizados na bancada experimental apresentada na Figura 13 e Figura 14, constituída por uma fonte de soldagem IMC Digiplus A7, um módulo de alimentação dinâmica de arame (MAD) com seu respectivo controlador, uma tocha de soldagem plasma AUTOGEN-RITTER PWM 300 acoplada em um manipulador cartesiano robótico SPS sistema cartesiano de soldagem (SCS) com controle de movimentação da tocha e da mesa baseado em CNC (Comando Numérico Computadorizado), uma unidade de refrigeração ativa Marconi modelo MA083 para a tocha, uma base refrigerada para fixação das chapas e um sistema de aquisição dos sinais elétricos portátil (SAP). O gás utilizado nos ensaios, argônio puro, foi fornecido pela rede central do laboratório. Além desses equipamentos, uma câmera de alta velocidade IDT modelo Y4S2, uma câmera térmica Flir SC7000 e um sistema de aquisição de temperatura (SAT) foram utilizados em alguns ensaios para atender aos objetivos propostos.

Figura 13. Bancada de ensaios: (a) Fonte de energia, (b) controlador do módulo de alimentação dinâmica, (c) tocha plasma, (d) manipulador robótico, (e) câmera térmica, (f) sistema de aquisição portátil (SAP), (g) módulo de alimentação dinâmica (MAD).



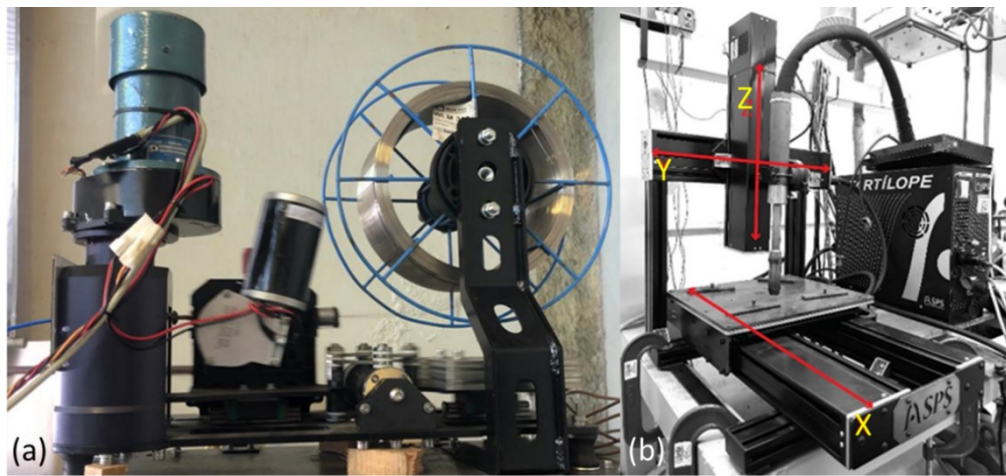
Figura 14. Bancada de ensaios: (c) Tocha plasma, (d) controlador do manipulador robótico e manipulador robótico, (g) módulo de alimentação dinâmica (MAD).



O Módulo de Alimentação Dinâmica (MAD), desenvolvido pelo Labsolda, é um cabeçote alimentador e oscilador responsável tanto pela alimentação quanto pelo movimento oscilatório de avanço e recuo do arame. O MAD é constituído por um bloco de roletes que

oscila sobre guias por meio de um mecanismo tipo Scotch Yoke, um sistema biela manivela com biela infinita. Através do controlador é possível definir a frequência de trabalho, que pode ser ajustada de 0,5 Hz até 20 Hz. O ajuste da amplitude de oscilação pode ser feito de forma contínua no próprio cabeçote atingindo valor máximo de 20 mm. O MAD ainda conta com um sistema de redução de vibração com contrapeso ajustável. O arame é guiado através de um duto flexível, denominado conduíte, desde o cabeçote alimentador até o bico direcionador. A Figura 15 apresenta o MAD (a) e o SCS (b).

Figura 15. (a) Módulo de alimentação dinâmica (MAD) e (b) Sistema Cartesiano de Soldagem (SCS).



Para a programação da trajetória de soldagem e movimentação da tocha e da mesa de trabalho foi utilizado o Sistema Cartesiano de Soldagem (SCS) desenvolvido pela fabricante SPS. Esse sistema possui três eixos de deslocamento (X, Y, Z), como pode ser visto na Figura 13. O controle do sistema para criação automática de trajetórias é feito pelo software CNC Mach3 instalado no computador.

A tocha Plasma utilizada nos ensaios é do fabricante AUTOGEN-RITTER GmbH, modelo PWM 300, refrigerada a água e com capacidade de corrente de até 300 A. O eletrodo empregado foi de 4,0 mm de diâmetro, de tungstênio dopado com 2% de tório em sua composição. A escolha do diâmetro do bico constritor e outros parâmetros serão discutidos na seção 3.2.2. A polaridade adotada foi a direta, ou seja, eletrodo negativo e peça positiva. A Figura 16 exhibe a configuração da tocha e do direcionador de arame, que foi disposto com ângulo de 20° em relação à peça. Mais detalhes do direcionador serão discutidos na seção 3.2.1.

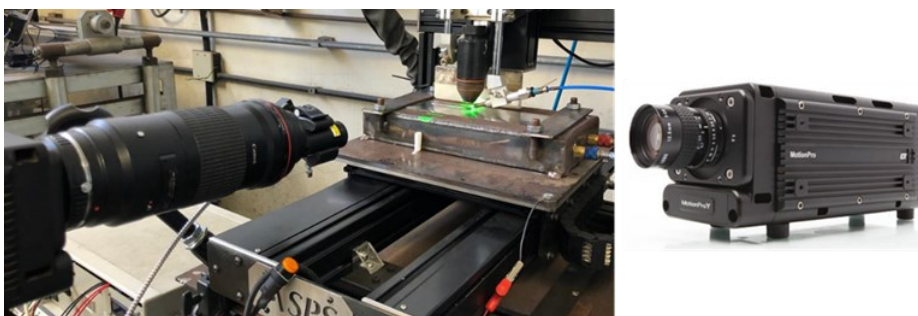
Figura 16. Tocha de soldagem plasma PWM 300 e direcionador de arame.



O sistema de refrigeração utilizado na tocha, modelo MA083 do fabricante Marconi, é independente da fonte e do cabeçote alimentador e possui vazão máxima de 10 l/min de água recirculada. A refrigeração tem ajuste de temperatura de trabalho de até  $-10,0^{\circ}\text{C}$  e reservatório com capacidade para 20 litros de água. A fonte de energia selecionada foi a multiprocessos Digiplus A7, da fabricante IMC. Este equipamento está habilitado para a utilização de processos TIG, Plasma e plasma pó, com faixa de operação de corrente entre 5 e 450 A.

A câmera termográfica aplicada para o monitoramento da temperatura durante a soldagem é a do fabricante Flir, modelo SC7000, com faixa de medição de  $-150$  a  $3000^{\circ}\text{C}$  e frequência de aquisição até 175 Hz. Para o monitoramento da movimentação do arame e da transferência metálica durante a soldagem dos cordões foi utilizada a câmera de filmagem em alta velocidade do fabricante IDT, modelo Y4S2 que tem máxima taxa de aquisição de 4500 fps com resolução de  $1024 \times 1024$  e iluminação laser marca Cavitar modelo Cavilux HF. A câmera é exibida na Figura 17.

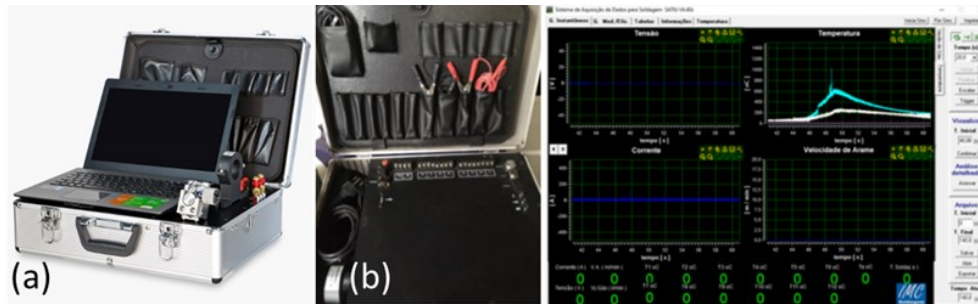
Figura 17. Câmera de filmagem em alta velocidade IDT, modelo Y4S2.



Para realizar a aquisição dos dados elétricos do processo, como a tensão e corrente, foi utilizado o Sistema de Aquisição de dados Portátil (SAP) dedicado à soldagem, com

frequência de aquisição de 5 kHz e erro de 3%. Para o monitoramento e aquisição da temperatura através de termopares tipo K, foi utilizado o Sistema de Aquisição de Temperatura (SAT). Os equipamentos SAP e SAT são exibidos na Figura 18.

Figura 18. (a) Sistema de Aquisição de dados Portátil dedicado à soldagem (SAP) e (b) Sistema de Aquisição de Temperatura (SAT).



### 3.1.2 Corpos de prova e consumíveis de soldagem

Para a realização das soldas utilizou-se como material de base chapas de aço carbono ASTM A36, com dimensões de 75 mm de largura, 220 mm de comprimento e espessura de 12,7 mm (1/2"). O arame utilizado na realização dos ensaios como material de adição foi o aço inoxidável comercialmente conhecido como 309L, com diâmetro de 1,2 mm. A composição química foi verificada com espectrometria de emissão óptica (OES) no próprio Labsolda. A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** e Tabela 2 apresentam os percentuais em peso dos elementos químicos presentes na chapa de aço utilizada como base e no arame respectivamente.

Tabela 1. Composição química da chapa de aço AISI 1010 realizada via OES.

<b>Composição Química aço AISI 1010 (%)</b>	
<b>Carbono (C)</b>	0,14
<b>Manganês (Mn)</b>	0,66
<b>Enxofre (S)</b>	0,032
<b>Silício (Si)</b>	0,12
<b>Fósforo (P)</b>	0,024

Tabela 2. Composição química do arame 309 L realizada via OES.

<b>Composição Química aço inoxidável 309 L (%)</b>	
<b>Carbono (C)</b>	0,031
<b>Cromo (Cr)</b>	22,42
<b>Níquel (Ni)</b>	12,25
<b>Manganês (Mn)</b>	1,78
<b>Molibdênio (Mo)</b>	0,064
<b>Fósforo (P)</b>	0,042
<b>Silício (Si)</b>	0,83
<b>Enxofre (S)</b>	0,015

O gás utilizado no processo de soldagem tanto para o arco plasma quanto para proteção foi o argônio puro (99,99% de pureza).

## 3.2 METODOLOGIA

### 3.2.1 Preparação da bancada de ensaios

Uma bancada de ensaios precisou ser montada e adequada especificamente para a manufatura aditiva com o processo plasma alimentado com arame. Algumas das modificações e melhorias realizadas na bancada se deram a partir de necessidades que surgiram ao longo dos primeiros ensaios. Nesta seção, serão expostas algumas melhorias pontuais que foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho, pensando na adequação à manufatura aditiva. São elas: fabricação de um novo direcionador de arame, modificação do programa plasma da fonte de soldagem e fabricação de uma base refrigerada.

A necessidade de fabricação de um novo direcionador surgiu após a realização dos primeiros ensaios exploratórios no processo plasma com alimentação de arame. Os primeiros cordões realizados com o direcionador de arame apresentaram perfil ondulado, causado pela falta de rigidez do dispositivo, que possui três eixos manuais para regulagem da posição do arame, não sendo possível garantir a repetibilidade de um cordão reto. A Figura 19 mostra exemplos dos primeiros cordões depositados.

Figura 19. Aspecto irregular dos cordões depositados nos ensaios iniciais com o processo plasma alimentado.



Para aumentar a rigidez do direcionador de arame, foram implementadas travas (parafusos) nos três eixos de movimentação. Antes de iniciar a solda o direcionador é posicionado da maneira desejada e em sequência as travas são apertadas, não sendo mais possível realizar ajustes durante o processo. A Figura 20 apresenta o direcionador com as travas adicionadas.

Figura 20. Direcionador de arame utilizado nos ensaios iniciais com o processo plasma após a implementação das travas nos eixos de movimentação.



O programa original da fonte para soldagem no modo plasma, no que diz respeito à alimentação de arame, contava apenas com a opção de configurar a velocidade. O arame começava a ser alimentado no instante em que o arco principal era estabelecido e tinha sua alimentação interrompida no mesmo momento em que o arco apagava, não havendo independência entre o arco elétrico e a alimentação de arame. Por esse motivo, na maioria dos



cordões soldados o arame ficava preso dentro da poça solidificada ao final da soldagem, como pode ser visto na Figura 21.

Figura 21. Cordões depositados nos ensaios iniciais evidenciando o arame solidificado junto com a poça ao final do processo.



Para solucionar esse problema e possibilitar maior flexibilidade na parametrização do processo foram feitas modificações no programa plasma da fonte. Essas modificações foram possíveis de serem implementadas devido a parceria do Labsolda com a fabricante IMC. As configurações adicionadas, específicas para a alimentação de arame, são mostradas na Figura 22.

tai – Tempo arame início – tempo de atraso na alimentação do arame após a abertura arco (s);

taf – Tempo arame fim – tempo de arco aberto após cessar a alimentação de arame (s);

tra – Tempo recuo arame – tempo de recuo do arame com velocidade de 2 m/min após acionado o comando para interromper a alimentação de arame (s).

Assim, quando o disparo para acender o arco é acionado, somente após o tempo “tai” começa a alimentação de arame. Ao acionar o comando para desligar, o arame para de ser alimentado imediatamente, iniciando o retorno pelo tempo programado em “tra” com a velocidade fixa de 2 m/min e a corrente continua atuando durante o tempo “taf”, para então iniciar a rampa de descida. Os tempos tai, taf e tra utilizados nos ensaios de referência são apresentados na Figura 22.

Figura 22. Display da fonte de soldagem com as novas variáveis desenvolvidas para soldagem plasma com alimentação de arame.



Novos ensaios foram realizados para avaliar o comportamento do direcionador com as travas e as modificações feitas no programa da fonte. Foi possível observar durante o processo de soldagem o aumento de rigidez do direcionador, gerando conseqüentemente cordões com geometria mais uniforme, em decorrência da maior estabilidade no direcionamento do arame. Da mesma forma, com as novas configurações disponíveis para parametrizar a alimentação de arame, foi possível evitar que o arame ficasse preso na poça ao final do cordão. Como forma de validar a intervenção feita no direcionador, foram realizados quatro depósitos sobre chapa, configurados com os mesmos parâmetros de soldagem, cujo resultado é apresentado na Figura 23. A diferença de geometria observada entre os depósitos foi atribuída à variação da temperatura da chapa. Todos os ensaios iniciais de preparação da bancada de trabalho foram soldados com alimentação contínua de arame e transferência metálica por ponte contínua. Os parâmetros utilizados estão descritos na Tabela 3.

Figura 23. Cordões depositados após as modificações realizadas no direcionador de arame e no programa plasma da fonte de soldagem.



Tabela 3. Parâmetros utilizados nos ensaios iniciais de preparação da bancada.

<b>Parâmetros dos ensaios</b>	
<b>Corrente</b>	<b>150 A</b>
<b>Vazão gás plasma</b>	<b>1,0 l/min</b>
<b>Gás</b>	<b>argônio</b>
<b>Distância bico-peça (DBP)</b>	<b>8 mm</b>
<b>Velocidade de arame</b>	<b>3,0 m/min</b>
<b>Diâmetro bico constritor</b>	<b>3,2 mm</b>
<b>Diâmetro do eletrodo</b>	<b>4,0 mm</b>
<b>Velocidade de soldagem</b>	<b>2,5 mm/s</b>
<b>Ângulo de inserção do arame</b>	<b>30°</b>

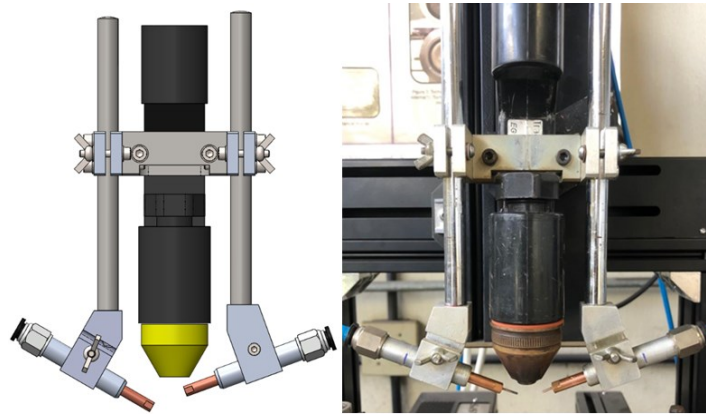
Devido às características inerentes do processo plasma com a alimentação de arame, para construir uma parede utilizando a estratégia de deposição de cordões variando o sentido de soldagem a cada camada, é necessário que a tocha ou a mesa rotacione 180 graus. Dessa forma, garante-se a alimentação do arame sempre no mesmo sentido, característica fundamental para a repetibilidade dos cordões ao longo do processo. O manipulador robótico e mesa SCS utilizado neste trabalho não possibilita a rotação da mesa e/ou da tocha. Por esse motivo, a estratégia de construção das paredes estaria limitada a depositar cordões no mesmo sentido. Uma alternativa é depositar os cordões sempre no mesmo sentido e buscar uma adequação dos parâmetros para minimizar os efeitos de acúmulo e falta de material ao início e final do cordão. Outra opção é a utilização de um gabarito e a cada cordão soltar a chapa, girar manualmente, e prende-la novamente para realizar o próximo cordão. Porém, além de ser difícil garantir o mesmo posicionamento, o empenamento da chapa atrapalha na fixação. Outra abordagem seria a fabricação de um direcionador dedicado para 2 arames, posicionados a 180 graus um do outro, possibilitando a soldagem nos dois sentidos sem necessidade de rotacionar a tocha ou a chapa.

Para atender futuras aplicações de manufatura aditiva na bancada e pensando num melhor aproveitamento das estratégias de deposição, um alimentador duplo foi projetado. Com o alimentador duplo é possível soldar em um único sentido e intercalar o começo e fim dos cordões para minimizar o aparecimento dos defeitos característicos e inerentes ao processo de soldagem, mantendo a uniformidade da geometria do cordão, principalmente nas partes inicial e final. Esse efeito pode acumular erros a medida que outras camadas são

depositadas resultando não só em uma geometria desigual, mas também em um acabamento superficial ruim e baixa precisão dimensional das peças construídas.

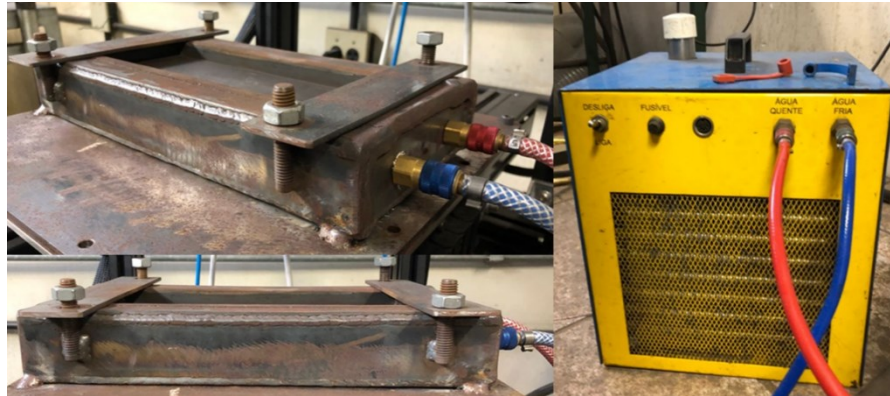
Outra vantagem de um alimentador duplo é a possibilidade de utilizar dois arames diferentes na deposição, fazendo uma deposição seletiva de diferentes materiais em cada camada, criando ainda mais possibilidades de estudos e pesquisas no WAAM. A Figura 24 apresenta o desenho do projeto do direcionador e o direcionador montado na tocha após fabricação pronto para utilização.

Figura 24. Alimentador duplo de arame desenvolvido no Labsolda para aplicação na manufatura aditiva com o processo plasma.



Com o objetivo de diminuir o tempo de interpasso entre os cordões, uma base refrigerada foi fabricada para otimizar o tempo de construção das paredes. A base refrigerada foi feita em aço carbono e possui canal interno para permitir a passagem de água. Uma entrada e uma saída de água foram adicionadas e conectadas em uma refrigeração externa modelo UPR da fabricante IMC. A base é retangular e tem um rebaixo na parte superior para o encaixe do corpo de prova. Para prender o corpo de prova, parafusos foram soldados na base e duas chapas estreitas e porcas foram usadas para finalizar a fixação. A Figura 25 mostra a base refrigerada e a refrigeração externa utilizada.

Figura 25. Base refrigerada desenvolvida para auxiliar no resfriamento da chapa durante a soldagem.



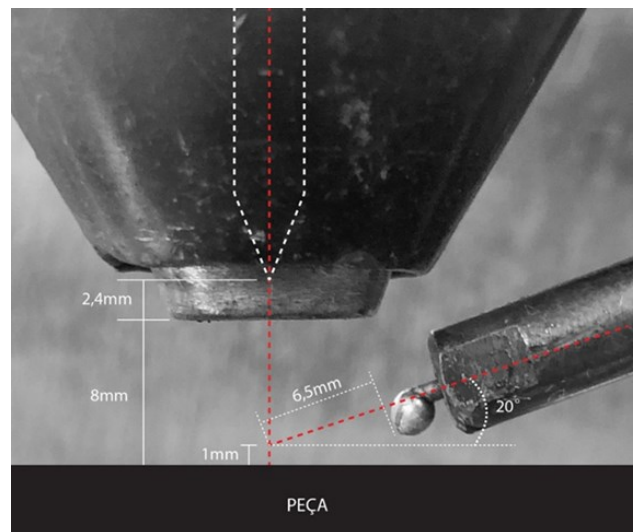
### 3.2.2 Definição dos parâmetros de soldagem

Os parâmetros de soldagem foram definidos de forma empírica, a partir dos ensaios preliminares, onde diversas combinações de parâmetros foram testadas. Como o objetivo do trabalho é a analisar a influência da frequência de oscilação do arame no resultado da solda, optou-se por manter todos os demais parâmetros constantes. Além disso, para a soldagem com alimentação contínua de arame, a transferência metálica em ponte contínua foi definida para os ensaios. Dessa forma, o desafio foi buscar a combinação de parâmetros e de variáveis do processo que resultasse em cordões contínuos e homogêneos tanto para a alimentação contínua, quanto para a alimentação dinâmica nas frequências de 3, 6, 9, 12 e 15 Hz.

Uma das variáveis mais importantes no processo plasma alimentado é o posicionamento do arame, sendo que uma variação milimétrica pode influenciar na transferência metálica e na geometria do cordão. Para as condições de soldagem adotadas nesse trabalho, foi constatado que quando o arame é inserido no arco a uma altura acima de 1 mm da superfície da chapa a transferência metálica se dá por intermitência, e quanto maior essa altura, maior a gota formada antes do destacamento. Por outro lado, quando o arame é inserido no arco encostando na superfície da chapa (altura zero), qualquer oscilação da velocidade de arame pode causar “stubbing”, ou seja, a colisão do arame ainda em estado sólido com a chapa. Tal efeito, se ocorre repetidas vezes, pode causar um desvio da geometria do cordão, em alguns casos resultar em um cordão descontínuo quanto à deposição de material e até alteração do posicionamento do direcionador de arame. Dessa forma, para garantir a alimentação contínua com transferência em ponte contínua, o direcionador de arame foi posicionado para que o arame seja inserido no arco a uma altura de 1,0 mm em relação à

chapa. O ângulo de inserção do arame aplicado foi de  $20^\circ$  em relação a superfície da chapa e a tocha posicionada perpendicularmente à chapa. A alimentação de arame foi realizada pela frente do arco elétrico. O eletrodo utilizado tem diâmetro de 4,0 mm, e foi afiado com ângulo de  $30^\circ$ . O recuo do eletrodo em relação ao bico constritor foi de 2,4 mm. A Figura 26 apresenta os principais parâmetros de posicionamento do processo.

Figura 26. Tocha de soldagem com os principais parâmetros de posicionamento das variáveis do processo.



Além do posicionamento do arame, outro parâmetro fundamental no processo plasma é o diâmetro do orifício do bico constritor. Para a tocha PWM-300 o fabricante oferece três opções de diâmetro de bico, de acordo com a corrente que se deseja usar. O bico com diâmetro de aproximadamente 2,3 mm é recomendado para soldagem com até 200 A de corrente, 2,9 mm recomendado para a soldagem até 250 A de corrente e o maior orifício, 3,2 mm para processos utilizando corrente de até 300 A. Para a aplicação na manufatura aditiva é preferencial, na maioria dos casos, um cordão com geometria mais convexa tanto para atingir maiores alturas com menor número de passes quanto para evitar um escorrimento dos cordões, aliado a isso uma baixa penetração também é preferível para que o cordão que está sendo depositado não funda e desfaça totalmente a geometria do cordão abaixo dele. A corrente definida para a realização dos ensaios foi 180 A, porém para a aplicação desejada e com o intuito de diminuir a pressão do arco foram testados o bico disponível comercialmente de 3,2 mm e mais dois diâmetros de bico, 3,4 mm e 3,9 mm, feitos aumentando o furo do bico de 3,2 com uma broca e furadeira de bancada. Os bicos são apresentados na Figura 27.

Figura 27. Bico constritor da tocha plasma PWM 300 com diâmetro de 3,2 mm e diâmetro de 3,9 mm.



Com o bico de 3,2 mm usando corrente de 180 A houve formação de *humping* no cordão causada pela alta pressão do arco, formando fundas concavidades com falta de material, impedindo a formação de um cordão de solda contínuo. Ao soldar com o bico de 3,9 mm, o arco ficou visivelmente mais largo, se assemelhando com um arco TIG e durante a soldagem ocorreu formação de poros no cordão, levando a concluir que a proteção gasosa da tocha para essa condição específica é ineficiente. O diâmetro de bico ideal, que trouxe os melhores resultados para as condições ensaiadas foi de 3,4 mm juntamente com uma baixa vazão de gás de plasma. O cordão resultante foi íntegro, apresentando geometria contínua e ausência de poros.

A vazão do gás de plasma é outro parâmetro que juntamente com o diâmetro do orifício constritor exerce alta influência no resultado final da solda, pois tem relação direta com a taxa de fusão de arame e com a pressão do arco. Como discutido no parágrafo anterior, a alta pressão do arco acarreta uma poça de fusão mais profunda, favorecendo o surgimento de defeitos como o *humping*. A combinação do diâmetro do orifício constritor e da vazão do gás de plasma deve ser ajustada de acordo com a aplicação do processo. Para a manufatura aditiva, vários trabalhos utilizam uma vazão inferior àquelas habitualmente usadas na soldagem de união. Para este último caso, comumente são usadas vazões de gás de plasma entre 1,5 e 2,5 l/min, já para aplicações na manufatura aditiva os valores encontrados na literatura normalmente variam de 0,5 a 1,0 l/min. Com esses valores baixos, a intenção é realmente que a vazão seja a mínima suficiente para estabelecer o arco piloto entre o eletrodo e o bico constritor e posteriormente o mesmo auxiliar a ignição do arco principal. Durante os testes preliminares foi observado que uma variação de apenas 0,2 l/min na vazão do gás, que é controlada pela fonte através de uma válvula mássica, pode mudar completamente o comportamento do arco e a geometria do cordão resultante. Os testes realizados com uma vazão de 1,0 l/min apresentaram alta penetração ao ponto de comprometer a homogeneidade

geométrica ao longo do cordão, mostrando uma tendência à formação de *humping*. Desta forma, a vazão do gás de plasma foi alterada para 0,8 l/min e novos cordões foram soldados. A mudança da vazão de gás diminuiu a profundidade de penetração do arco e o cordão resultante apresentou geometria contínua. Devido à alta sensibilidade do processo a pequenas variações de vazão de gás de plasma, um medidor de vazão de gás MVG foi conectado em série no circuito fonte de soldagem – tocha para que pudesse ser feito o acompanhamento durante a soldagem do valor da vazão de gás.

Depois dos testes preliminares exploratórios de algumas das principais variáveis do processo plasma para a definição do melhor conjunto de parâmetros para atingir os objetivos deste trabalho os parâmetros definidos podem ser vistos na Tabela 4.

Tabela 4. Parâmetros de soldagem definidos para realização dos ensaios de soldagem dos cordões e das paredes.

<b>Parâmetros de soldagem</b>	
<b>Corrente</b>	180 A
<b>Velocidade de soldagem</b>	15 cm/min
<b>Velocidade de arame</b>	1,7 m/min
<b>Vazão gás de plasma</b>	0,8 l/min
<b>Corrente arco piloto</b>	15 A
<b>Vazão gás de proteção</b>	13 l/min
<b>Diâmetro bico constritor</b>	3,4 mm
<b>Diâmetro eletrodo</b>	4,0 mm
<b>Recuo eletrodo</b>	2,4 mm

Outros parâmetros essenciais para o desenvolvimento deste trabalho são os referentes à alimentação dinâmica de arame, como a amplitude e a frequência de oscilação. Como descrito na seção 3.1.1 sobre os materiais utilizados nesse trabalho, o MAD opera em frequências de 0,5 Hz a 20 Hz. Em alguns estudos anteriores realizados por outros pesquisadores do Labsolda percebeu-se que nas frequências de operação mais altas, principalmente entre 18-20 Hz o equipamento apresenta alguns problemas de excesso de vibração de toda sua carcaça prejudicando a alimentação de arame e conseqüentemente o resultado da solda, bem como a confiabilidade da movimentação do arame realizada pelos roletes. Por esse motivo, a frequência máxima estipulada na realização deste trabalho foi de 15 Hz.



Para definir a menor frequência a ser utilizada nas comparações deste trabalho foi levado em consideração a velocidade de alimentação de arame, visto que, se a frequência de oscilação for muito baixa para determinada  $V_a$ , somente haverá o movimento positivo de arame. Dessa forma, o efeito desejado de avanço e retrocesso de arame, que caracteriza a alimentação dinâmica, não seria alcançado. Para calcular a frequência mínima de alimentação dinâmica para a velocidade de soldagem definida (1,7 m/min), foi calculada a velocidade de avanço do arame juntamente com a velocidade de avanço do movimento do bloco de roletes do alimentador de arame MAD. De maneira análoga, a velocidade de retrocesso do bloco de roletes foi diminuída da velocidade de avanço do arame. Se a diferença dessas duas velocidades é positiva, significa que o arame não apresenta um movimento real de retração, ou seja, o retrocesso do bloco tracionador tem impacto apenas na redução da velocidade de avanço, sendo mantida a direção de avanço. Se a diferença entre as duas velocidades apresenta valor negativo é porque o arame apresenta um movimento de retração, ou seja, para trás, afastando-se da peça. Dessa forma, tem-se:

$$V_{br} = A \cdot f \cdot 2 \quad (2)$$

$$V_{avanço} = V_a + A \cdot f \cdot 2 \quad (3)$$

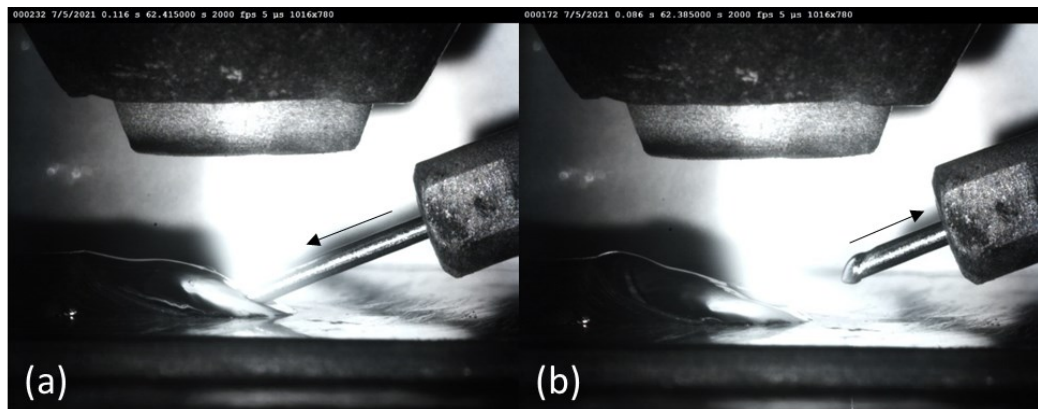
$$V_{recuo} = V_a - A \cdot f \cdot 2 \quad (4)$$

Onde,  $V_{br}$  é a velocidade do bloco de roletes (mm/s),  $V_a$  é a velocidade de arame regulada na fonte (m/min),  $A$  a amplitude do movimento (mm) e  $f$  a frequência. Então, para uma determinada  $V_a$ , existe uma frequência mínima a partir da qual a velocidade de arame resultante é negativa, resultando no movimento de retrocesso do arame caracterizando a alimentação dinâmica oscilante de arame. Abaixo dessa frequência, a movimentação de arame é caracterizada como dinâmica pulsante, onde a velocidade de alimentação varia, porém é sempre no sentido positivo, em direção à poça.

Além da frequência de oscilação, a amplitude do movimento oscilatório é um parâmetro que precisa ser definido. A amplitude máxima está intimamente relacionada com as condições de soldagem e posicionamento dos elementos como a tocha e o direcionador de arame. A amplitude é o parâmetro que define o comprimento do movimento linear de avanço e retrocesso dos roletes do alimentador resultando consequentemente no movimento do arame. Este comprimento também define o quanto o arame entra e sai do arco, como pode ser visto na Figura 28. Vale ressaltar que a amplitude do movimento do bloco de roletes não

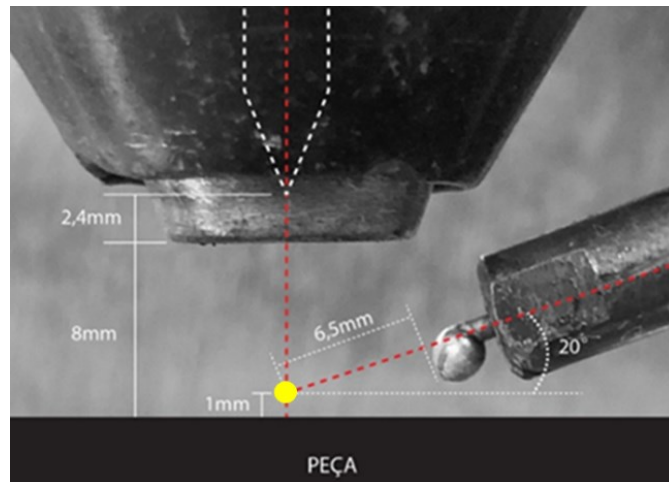
necessariamente será a mesma desempenhada pelo arame na ponta do direcionador, alguns fatores como comprimento e disposição do conduíte e a própria força de atrito podem interferir.

Figura 28. Arame em seu máximo avanço (a) e máximo recuo (b) ilustrando a amplitude de oscilação.



Para definir a amplitude a ser utilizada nos ensaios, uma metodologia simples foi aplicada. Com os parâmetros elétricos e de posicionamento já definidos, descritos na Tabela 5, a ponta do arame foi posicionada no eixo do eletrodo, a 1 mm de altura em relação a chapa base (ponto amarelo Figura 29). Posteriormente ao posicionamento do arame um arco elétrico foi aberto, com a tocha parada e sem alimentar arame. Após cerca de 5 segundos de estabilidade o arco foi desligado e o comprimento de arame fundido foi mensurado, sendo este o valor definido como o comprimento em que o arame sai do arco. A Figura 29 apresenta o arame após a realização do ensaio. Pela Figura 29 é possível ver que o comprimento de arame que foi fundido no teste de definição de amplitude foi de 6,5 mm, sendo este valor, então, considerado o limite de amplitude a ser utilizado nos ensaios para estas condições. Levando em conta a proximidade com o bico e a possibilidade de o arame solidificar preso ao mesmo, uma amplitude de 5 mm foi definida para dar prosseguimento aos ensaios deste trabalho. Nas condições estudadas foi definido que os 5 mm são comprimento suficiente para que haja o movimento de entrada e saída do arame na poça, mesmo que não saia completamente da zona de influência do arco elétrico.

Figura 29. Tocha de soldagem com os principais parâmetros de posicionamento evidenciando a posição inicial da ponta do arame antes do ensaio de definição da amplitude.



### 3.2.3 Depósito de cordão único sobre chapa

Com o intuito de avaliar a influência das diferentes frequências nas características de um único cordão de solda, uma matriz de ensaios foi definida mantendo constante todos os parâmetros de soldagem descritos na Tabela 5 variando apenas a frequência de oscilação do arame, em incrementos de 3 em 3 hertz. A amplitude adotada para todos os casos foi de 5 mm e os cordões foram soldados com comprimento de 150 mm. Para a soldagem com alimentação contínua, foi definida a transferência metálica em ponte contínua. A Tabela 5 apresenta a matriz de ensaios utilizada.

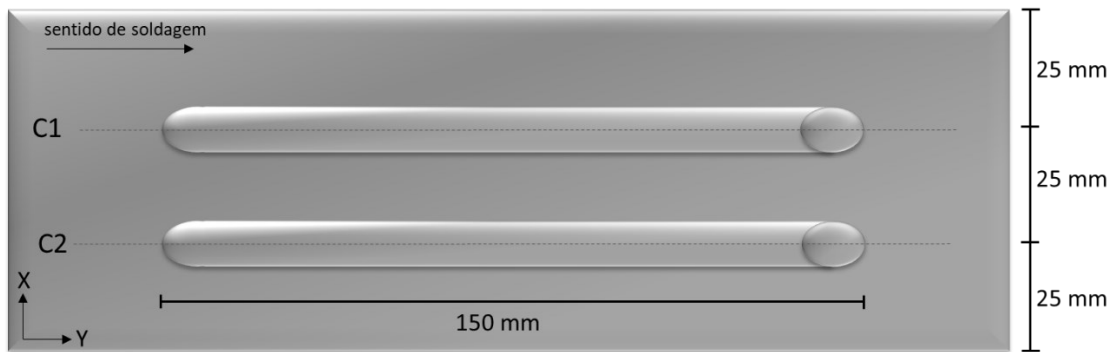
Tabela 5. Matriz de ensaios definida para soldagem de depósito dos cordões sobre chapa.

Matriz de ensaios cordões					
Nome	Corrente (A)	Vs (cm/min)	Va (m/min)	Amplitude (mm)	Frequência alimentação de arame (Hz)
C1					0 (contínua)
C2					3
C3					6
C4	180	15	1,7	5	9
C5					12
C6					15

Foram realizados dois ensaios em cada corpo de prova, chapas descritas no item 3.1.2, o segundo cordão foi feito depois do resfriamento total da chapa após a soldagem do primeiro

cordão, para manter as mesmas condições iniciais de ensaio. Os cordões foram soldados no sentido do eixo Y da mesa do manipulador robótico com a chapa parada e movimentação da tocha de soldagem plasma. A Figura 30 ilustra a disposição dos cordões na chapa.

Figura 30. Esquemático do posicionamento dos cordões soldados na chapa base.



Os ensaios foram repetidos três vezes para cada conjunto de parâmetros e a metodologia de instrumentação utilizada em cada um desses ensaios está descrita na Tabela 6.

Tabela 6. Distribuição de procedimentos de instrumentação nos ensaios com cordões sobre chapa.

Nome	Ensaio	Instrumentação
C1 – C6	1	SAP
	2	Câmera IR + Termopar + SAP
	3	Câmera alta velocidade + SAP

Durante a definição dos parâmetros de soldagem foi constatado que para uma mesma amplitude ajustada no MAD, variando a frequência de oscilação havia uma variação significativa na amplitude resultante na ponta do arame. A amplitude aumentou com o aumento da frequência, comportamento que pode ser justificado, dentre outros fatores, pelo aumento da velocidade de movimentação do bloco de roletes e do arame, e fenômenos envolvendo o atrito entre o arame e o condúite. Para tentar minimizar esses efeitos e garantir a amplitude proposta de 5 mm, antes de cada ensaio para as diferentes frequências a amplitude foi ajustada com o auxílio de uma régua e a câmera de um celular com recurso de filmagem em slow-motion (Figura 31).

Figura 31. Esquemático da configuração utilizada para ajuste da amplitude juntamente com câmera slow-motion.



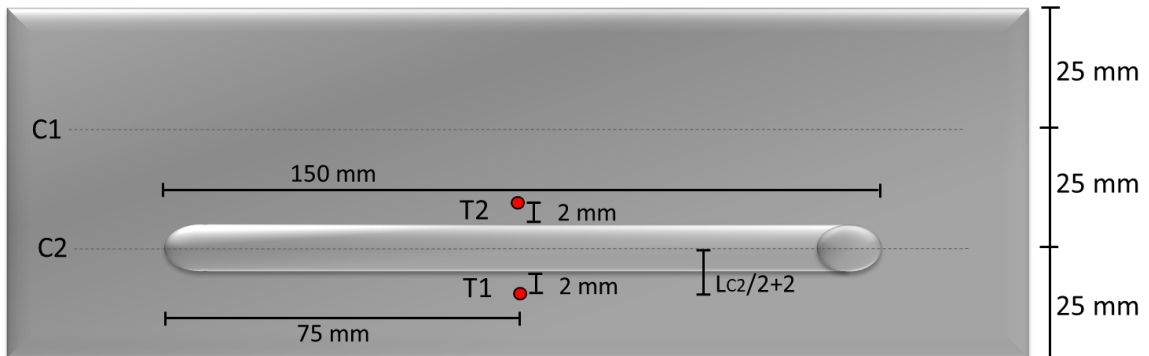
Os sinais elétricos adquiridos com o SAP foram a corrente de soldagem do processo e duas tensões, uma entre o eletrodo e a peça (tensão do arco) e outra entre o eletrodo e o arame. Para a aquisição da tensão são usadas garras-jacaré conectadas em bornes negativo e positivo da maleta SAP. Na medição da tensão do arco, uma garra negativa foi ligada ao polo negativo da fonte (eletrodo) e uma garra positiva foi fixada na mesa para a tensão da peça. Para a aquisição da tensão entre o eletrodo e o arame, uma segunda garra negativa também foi conectada ao polo negativo da fonte e uma garra positiva foi fixada no bico direcionador de arame. A aquisição da corrente é feita por um alicate sensor Hall preso no cabo de corrente.

Para a realização do ensaio 2 com monitoramento da temperatura, as chapas foram divididas em três partes iguais no sentido de sua largura, conforme mostram as linhas pontilhadas na Figura 32. As linhas foram marcadas com um riscador e sinalizam a posição de soldagem dos dois cordões na chapa. A partir da largura de cada cordão, medido no ensaio 1 de cada frequência, foram marcados com um punção os pontos para a soldagem dos termopares T1 e T2. O posicionamento dos dois termopares foi definido na metade do comprimento total do cordão (75 mm), em ambos os lados, a uma distância de 2,0 mm da borda do cordão, conforme a Equação 5. Os pontos para soldagem dos termopares estão representados como pontos vermelhos na Figura 32.

$$d = \left(\frac{L_{cn}}{2}\right) + 2 \quad (5)$$

Onde  $d$  é a distância do termopar ao centro do cordão soldado e  $L_{cn}$  é a largura do cordão  $n$ .

Figura 32. Posicionamento dos termopares na soldagem dos cordões.



A câmera térmica foi posicionada a uma distância de 1,0 m da tocha de soldagem, de maneira a enquadrar todo o comprimento do cordão. O ângulo foi de aproximadamente  $30^\circ$  em relação ao plano da chapa, a faixa de temperatura utilizada foi a de 300 a  $1500^\circ\text{C}$ . A taxa de aquisição da filmagem foi de 10 Hz em uma resolução de  $320 \times 256$  pixels.

Para os ensaios com filmagem em alta velocidade, a câmera foi montada a uma distância de aproximadamente 60 cm do cordão soldado com uma inclinação de cerca de  $5^\circ$ . A lente utilizada nos ensaios foi a da fabricante Canon, modelo Macro Canon EF 180 mm L USM, e foi utilizada iluminação laser e um filtro de 810 nm. A Figura 33 exibe a disposição da bancada para os ensaios.

Figura 33. Disposição da bancada de ensaios para a filmagem em alta velocidade.



### 3.2.4 Construção das paredes

Par atender aos objetivos propostos no trabalho, além da soldagem de cordão único sobre chapa, foram construídas paredes com o processo WAAM com três frequências diferentes. As paredes foram soldadas utilizando os mesmos parâmetros dos cordões C1, C4 e C6. A Tabela 7 apresenta a matriz de ensaios utilizada na construção das paredes.

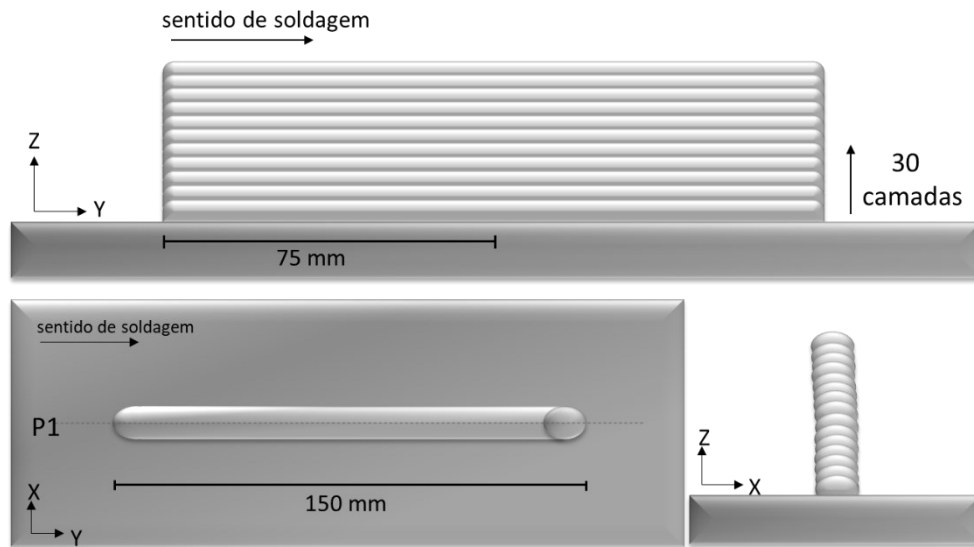
Tabela 7. Matriz de ensaio definida para as paredes.

<b>Matriz de ensaios paredes</b>					
<b>Nome</b>	<b>Corrente (A)</b>	<b>Vs (cm/min)</b>	<b>Va (m/min)</b>	<b>Amplitude (mm)</b>	<b>Frequência alimentação de arame (Hz)</b>
<b>P1</b>					0 (contínua)
<b>P2</b>	180	15	1,7	5	9
<b>P3</b>					15

Cada parede é constituída pelo depósito de 30 cordões sobrepostos verticalmente, com 150 mm de comprimento e soldados no sentido do eixo Y da mesa do manipulador robótico com a chapa parada e movimentação da tocha de soldagem plasma. Apesar da fabricação de um direcionador duplo para tornar possível adotar a estratégia de deposição de alternar o sentido de soldagem a cada camada, optou-se pelo depósito de todas as camadas no mesmo sentido. A justificativa para isso está na disposição do conduíte e seu comprimento, visto que para garantir maior estabilidade e precisão de velocidade e amplitude na oscilação do arame esses parâmetros são fundamentais. Desse modo, como pode ser visto nas Figuras 11 e 12 da seção 3.1.1, não foi viável a cada nova camada mover o MAD para o lado oposto para trocar o conduíte de direcionador e mantê-lo parcialmente esticado, sem nenhuma curva de pequeno raio. Outra solução seria apenas trocar o conduíte de direcionador, porém seria inevitável a ocorrência de uma curva de quase 180° que com certeza prejudicaria e traria diferenças significativas de alimentação entre os sentidos de soldagem.

Todas as aquisições de SAP e câmera térmica foram realizadas simultaneamente e salvos camada por camada. A Figura 34 apresenta um esquemático ilustrativo das paredes.

Figura 34. Metodologia de construção das paredes.



A temperatura entre camadas utilizada foi de 100 °C, com o intuito de garantir que não houvesse variações significativas na geometria dos cordões. A temperatura entre passes foi medida com medida na superfície dos cordões com um termômetro digital de contato portátil.

As configurações e posicionamento da câmera térmica foram as mesmas utilizadas no depósito de cordão único, distância de aproximadamente 60 cm entre a câmera e a parede, ângulo de aproximadamente 30° em relação ao plano da chapa e a faixa de temperatura utilizada foi a de 300 a 1500°C. A taxa de aquisição da filmagem foi de 10 Hz em uma resolução de 320 x 256 pixels.

Durante a construção da parede 1 foi testada a eficiência da base refrigerada no que diz respeito ao tempo de resfriamento dos cordões. Após a solda dos cordões 16 e 17 foram medidos os tempos de resfriamento dos cordões logo após a extinção do arco até que ambos atingissem a temperatura de 100 °C, que foi a temperatura de interpasse utilizada entre as camadas das paredes. O cordão 16 foi soldado com a utilização da base refrigerada e demorou 5 minutos e 5 segundos para resfriar até atingir os 100°C. Já o cordão 17 foi soldado com a base desligada, ou seja, sem circulação de água em seu interior, e demorou 6 minutos e 40 segundos para resfriar até os mesmos 100°C, ou seja, a utilização da base refrigerada acarretou uma redução de 23,75 % no tempo de espera entre passes. Após a soldagem a temperatura da água dentro do reservatório da unidade de refrigeração foi medida com um termopar e apresentou temperatura de 25,3°C.



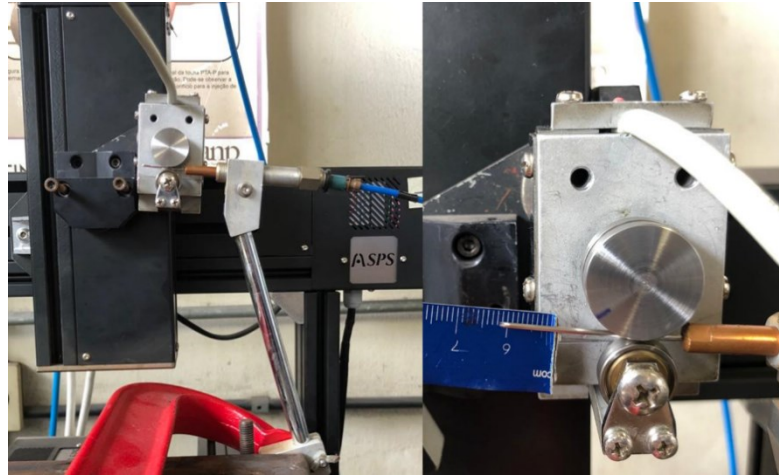
### **3.2.5 Análise das características elétricas, geométricas, térmicas e microestruturais dos cordões e paredes**

#### *3.2.5.1 Análise dos sinais elétricos*

Para a compreensão dos sinais elétricos do processo e o comportamento da alimentação dinâmica de arame para as diferentes frequências, os sinais de tensão, corrente e temperatura foram adquiridos pelo SAP durante o processo de soldagem. Todos os dados foram exportados para o Excel para plotar os gráficos correspondentes. Para o cálculo dos valores médios de tensão e corrente foram utilizados os valores de 5 segundos consecutivos de aquisição entre 30 e 35 segundos (meio do cordão). Os oscilogramas apresentados como figuras neste trabalho representam apenas 1 segundo dos 60 segundos correspondentes a aquisição completa do cordão de soldagem, dessa forma é possível identificar em mais detalhes os ciclos de oscilação de arame para as diferentes frequências estudadas. O tempo máximo de aquisição dos termopares no SAP é de 120 s e os dados obtidos foram plotados em forma de gráficos para todos os cordões.

A medição da velocidade de alimentação de arame foi realizada em ensaio sem soldagem, visto que o *encoder*, dispositivo utilizado para transformar posição em sinal elétrico digital, precisou ser posicionado na ponta do bico direcionador de arame, conforme Figura 35. O *encoder* utilizado tem resolução de 2048 pulsos por volta e relação de 0,0086 mm por pulso. O intuito foi o de garantir uma medição de velocidade mais condizente com as condições de soldagem, ou seja, na ponte do arame e com a mesma disposição do conduíte. O ensaio foi realizado para todas as frequências estudadas.

Figura 35. Ensaio para aquisição da velocidade de alimentação de arame, evidenciando o posicionamento do *encoder* e do direcionador de arame.

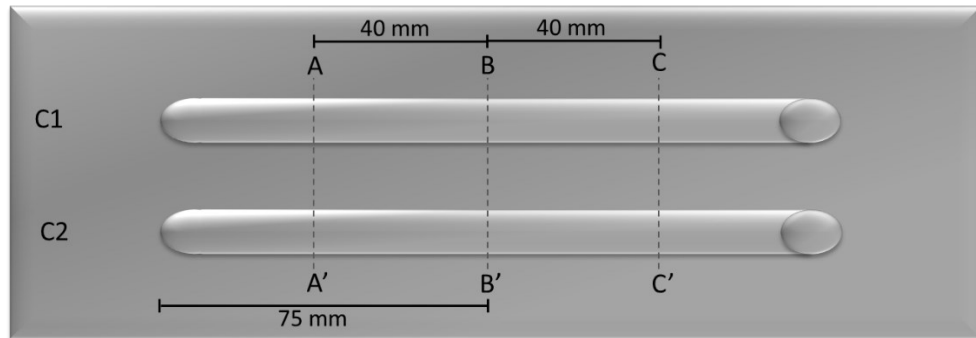


Na construção das paredes a aquisição dos sinais elétricos foi realizada individualmente, cordão por cordão, totalizando 30 aquisições por parede. De forma análoga à análise dos cordões, os resultados foram exportados para o Excel para plotar os gráficos com informações de todas as camadas.

#### 3.2.5.2 *Análise geométrica*

Para a análise da geometria dos cordões, após soldados, os corpos de prova foram cortados com o auxílio de uma serra fita em quatro partes, conforme ilustrado na Figura 36, para análise no início, meio e final dos cordões. Em seguida, as amostras foram preparadas metalograficamente com lixas d'água com granulação 80, 120, 320, 400, 600 e 1200, e posteriormente polidas com alumina 1,0  $\mu\text{m}$ . O ataque químico foi realizado por imersão das amostras durante 5 segundos em Nital 10% (90% álcool etílico absoluto e 10% ácido nítrico em volume).

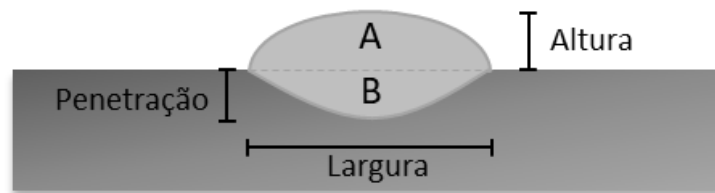
Figura 36. Indicação das linhas de corte para análise macrográfica dos cordões.



Após a preparação, as amostras foram fotografadas com a câmera Canon 60d utilizando uma lente de 180 mm macro e a partir das imagens foram calculadas a altura, largura e diluição dos cordões, conforme Figura 37. Todas as medições dimensionais foram realizadas com o software de análise de imagens Image J.

Figura 37. Esquemático das grandezas medidas nos cordões e cálculo da diluição.

$$\text{Diluição (\%)} = \frac{B}{A+B} \times 100$$



Para a análise geométrica das paredes, após soldados, os corpos de prova foram seccionados transversalmente em duas regiões conforme ilustrado na Figura 38. A seção do meio, de 20 mm de largura foi posteriormente cortada no sentido longitudinal, como mostra a Figura 39. Os cortes foram realizados por eletroerosão a fio.

Figura 38. Indicação das linhas de corte no sentido transversal das paredes.

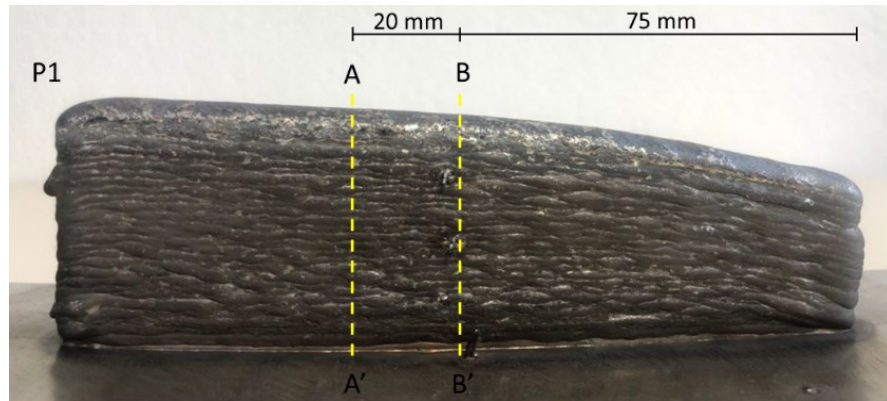
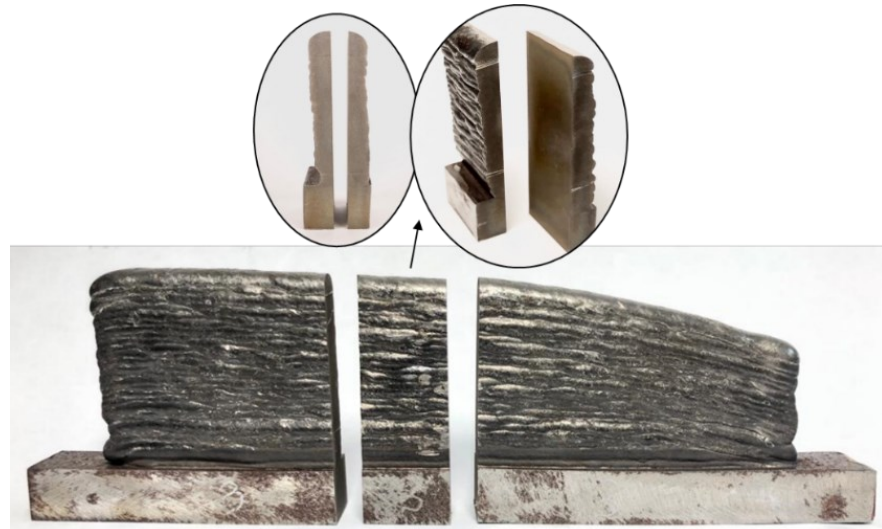


Figura 39. Parede após os cortes no sentido transversal e longitudinal.



A etapa posterior ao corte foi a preparação metalográfica das paredes, de forma análoga à preparação dos cordões. Foram utilizadas lixas d'água com granulação 80, 120, 320, 400, 600 e 1200, e posteriormente polimento com alumina  $1,0\ \mu\text{m}$ . O ataque químico foi realizado por imersão das amostras durante 5 segundos no reagente Marble ( $4\text{g CuSO}_4 + 20\text{ml HCl} + 20\text{ml H}_2\text{O}$ ).

Após a preparação, as paredes foram fotografadas com a câmera Canon 60d utilizando uma lente de 180 mm macro e a partir das imagens foram calculadas a altura, largura e área das paredes. Com o auxílio do software de análise de imagens Image J.

Com o objetivo de identificar possíveis defeitos internos nas paredes, como porosidade ou falta de fusão, foram realizadas análise de raio-x das paredes com o equipamento do fabricante GE, modelo ERESO MF4.

### 3.2.5.3 Análise das características térmicas

A temperatura dos cordões durante o processo de soldagem foi adquirida com termopares tipo K e com a câmera térmica. Os dados dos termopares obtidos através do SAT foram exportados para o Excel para plotagem das curvas de temperatura. Os vídeos obtidos pela câmera térmica foram analisados no software Altair (software da câmera) e os dados obtidos foram exportados para o Excel. A faixa de temperatura utilizada na aquisição dos vídeos foi a de 300-1500°C e a emissividade 0,9. A metodologia de análise dos vídeos consistiu em traçar uma linha horizontal A-B da metade do comprimento do cordão (75 mm do início – ponto A) para trás (ponto B). O comprimento dessa linha foi determinado pela temperatura final de 300 °C (ponta mais distante do arco). A metodologia foi repetida para todas as frequências estudadas. A Figura 40 ilustra a metodologia utilizada para análise no software Altair.

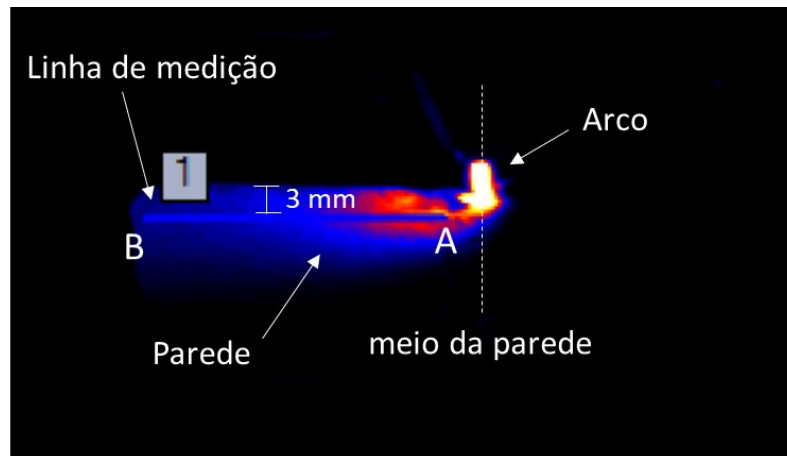
Figura 40. Metodologia de análise de temperatura dos cordões através dos vídeos obtidos pela filmagem térmica.



Na construção das paredes os dados foram adquiridos e salvos como 30 cordões individuais. Os dados obtidos através dos termopares foram exportados para o Excel e os valores máximos de temperatura de cada cordão foram utilizados para a análise. De forma análoga à análise dos cordões, a metodologia aplicada nas paredes consistiu em traçar uma linha horizontal A-B no sentido da metade do comprimento da parede (aproximadamente 75 mm) para o início da parede a cerca de 3 mm do topo da parede no sentido vertical, como

mostra a Figura 41. O objetivo foi obter o gradiente de temperatura ao longo da linha traçada. As análises foram realizadas na décima, vigésima e trigésima camada de cada parede.

Figura 41. Metodologia de análise de temperatura das paredes através dos vídeos obtidos pela filmagem térmica.



#### 3.2.5.4 Análise da microestrutura das paredes

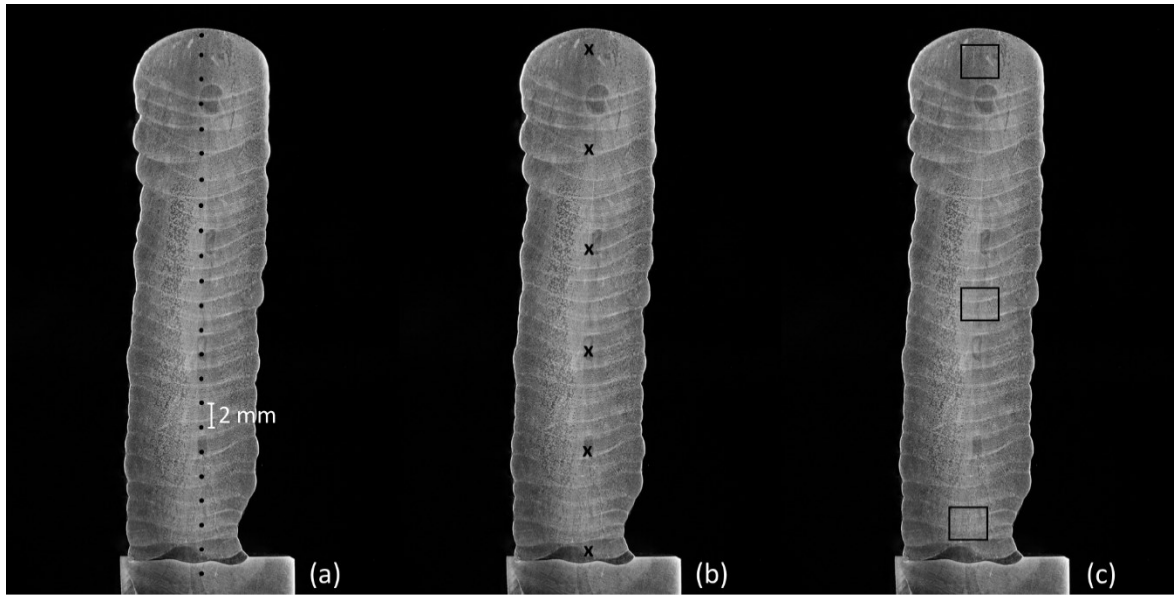
A análise da microestrutura das paredes foi realizada a partir das amostras cortadas e preparadas metalograficamente, as mesmas utilizadas para análise geométrica. A microestrutura das paredes foi analisada com o auxílio de um Microscópio Óptico (MO), modelo AxioLab 5 da fabricante Zeiss e um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) modelo VEGA3 do fabricante TESCAN. A Figura 42 apresenta as regiões de análise.

Com o auxílio de um microdurômetro VH 1102 do fabricante Wilson Hardness foram realizados os perfis de microdureza das paredes, começando as indentações no material de base e subindo verticalmente com distância de 2,0 mm entre as medições até o topo da parede, como mostra a Figura 42 (a). A carga utilizada foi de 1 kg com tempo de indentações de 10 s.

Utilizando um ferritoscópio da fabricante Fischer modelo FMP30 foram medidas a quantidade de fase ferrítica das paredes. Foram realizadas seis medições da base ao topo de cada parede como mostra a Figura 42 (b).

O perfil de composição química das paredes foi realizado utilizando a espectrometria de emissão óptica. Foram realizadas três análises em cada parede, uma na base, uma no meio e uma no topo das paredes (Figura 42 (c)).

Figura 42. (a) Pontos de medição de microdureza, (b) pontos de medição de fase ferrítica e (c) áreas de análise da microestrutura das paredes.



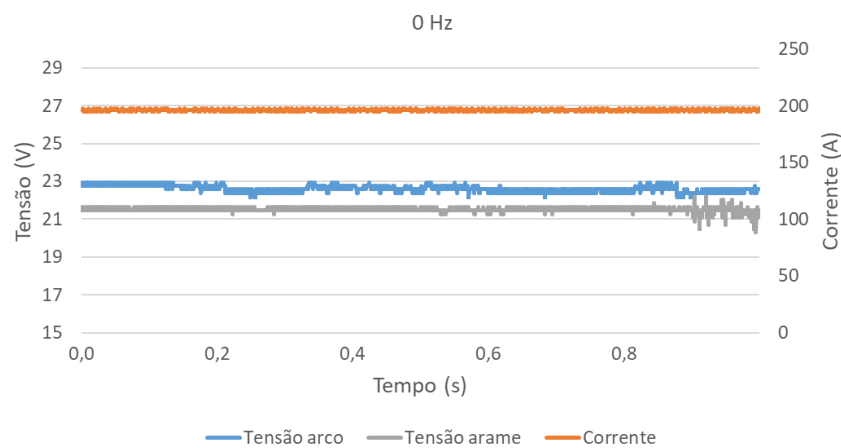
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 DEPÓSITO DE CORDÃO ÚNICO SOBRE CHAPA

#### 4.1.1 Análise dos sinais elétricos e estabilidade do processo

A primeira parte da análise dos dados aqusitados dos cordões foi direcionada à compreensão dos sinais elétricos do processo e o comportamento da alimentação dinâmica de arame para as diferentes frequências. Os sinais elétricos foram aqusitados com o SAP, sendo eles a tensão elétrica entre o eletrodo e a peça (tensão do arco elétrico), a tensão entre o eletrodo e o arame (chamado para simplificar de tensão do arame) e a corrente de soldagem do processo. Os oscilogramas apresentados como figuras neste trabalho apresentam apenas 1 dos 60 segundos correspondentes a aquisição completa do cordão de soldagem. Os valores médios dos dados aqusitados estão expostos na Tabela 9. A Figura 43 apresenta o oscilograma obtido na soldagem com alimentação contínua de arame.

Figura 43. Oscilograma de corrente e tensão da soldagem com alimentação contínua de arame.

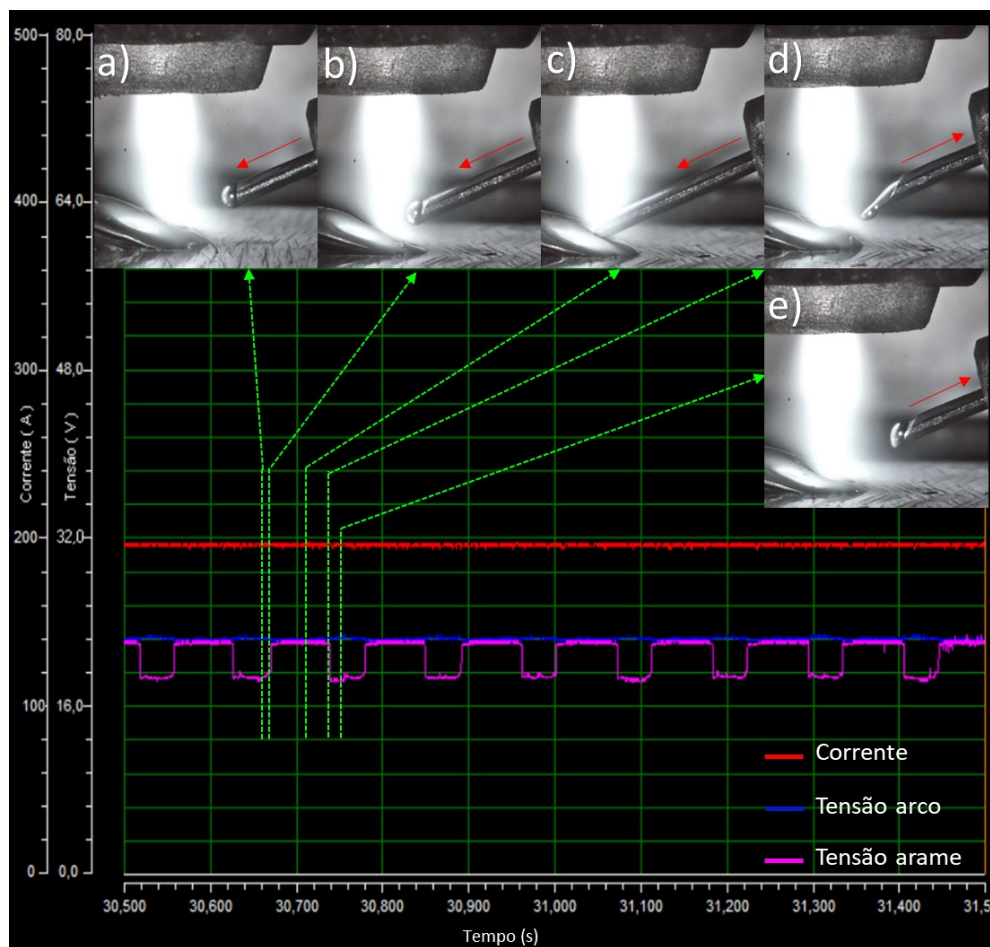


Como o arame fica em contato contínuo com a poça de soldagem, é possível observar no oscilograma que a tensão entre o eletrodo e o arame se mantém constante durante o processo, sendo, portanto, uma característica da alimentação contínua com transferência metálica em ponte. O valor de tensão média do arame obtido na alimentação contínua foi de 21,4 V (Tabela 9). A tensão do arco também é constante no processo e apresenta valor médio de 22,5 V, cerca de 1 V a mais que a tensão do arame. Quanto à corrente de soldagem do processo, a média resultante foi de 196 A.



Já na soldagem com alimentação dinâmica, o comportamento da tensão do arame não é linear e constante, como na alimentação contínua. A tensão varia de acordo com o movimento de avanço e recuo do arame, atingindo valores próximos à tensão do arco quando se encontra dentro da poça (ponte) e valores inferiores aos do arco nos momentos em que se encontra afastado da poça. A Figura 44 ilustra a relação entre a tensão e o movimento do arame.

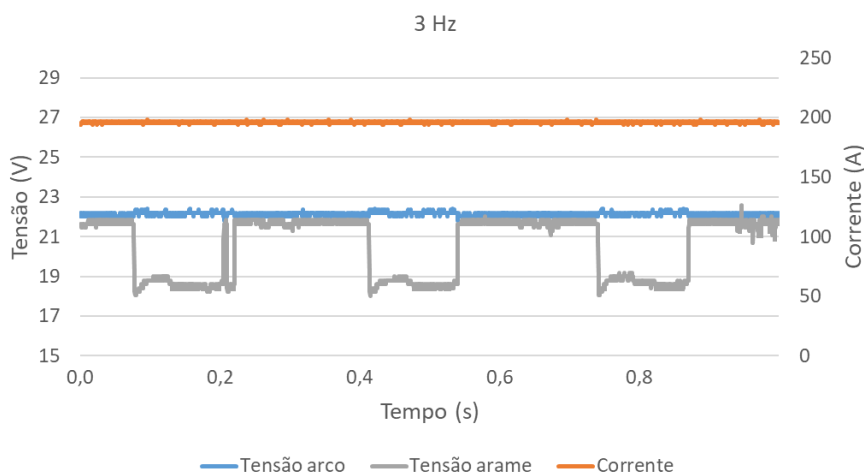
Figura 44. Oscilograma esquemático correlacionando a tensão do arame com o movimento do arame ao longo de um ciclo.



O comportamento da tensão entre o eletrodo e o arame pode ser explicado pelo grau de inserção do arame no arco e na poça. Quando o arame está em contato com a poça, ele faz parte do circuito de soldagem e encontra-se no mesmo potencial que a peça. Por essa razão a tensão entre o arame e eletrodo assume valores próximos à tensão do arco. Por mais que haja a ponte metálica e o arame esteja imerso na poça de fusão, a distância entre eletrodo e o arame

é menor que o comprimento do arco entre eletrodo e peça/poça. Logo, os valores de tensão entre arame e eletrodo são ligeiramente inferiores à tensão do arco. Por outro lado, quando o arame não está mais em contato com a poça e se afasta da mesma, ele deixa de fazer parte do circuito principal de soldagem, caracterizando uma queda na tensão entre eletrodo e arame. Embora o arame seja recuado, visivelmente, para fora do arco, os valores de tensão entre arame e eletrodo medidos foram da ordem de 18 V. Segundo Vilarinho [48], além da região visível do arco elétrico, onde ocorre a saturação iônica, existem outras duas regiões mais afastadas não visíveis a olho nu, a região de saturação eletrônica e a região de condição flutuante. A região de saturação eletrônica demonstra a posição mais afastada do centro do arco onde existem elétrons disponíveis, mas não suficientes para proporcionar emissão de radiação luminosa significativa. Nesta região de saturação eletrônica ainda há corrente sendo carregada, visto que os elétrons são responsáveis por cerca de 97% do total de corrente. A zona flutuante é caracterizada pela região onde há influência do campo eletromagnético gerada pelo arco, e corresponde à região mais externa do arco elétrico. Pelos resultados encontrados, a hipótese é que o arame, quando afastado da poça, encontra-se na região de saturação eletrônica, visto que a tensão é diferente de zero. Nos ensaios, o afastamento máximo do arame em relação ao centro foi da ordem de 4 mm. A Figura 45 contém o oscilograma referente a soldagem com alimentação dinâmica com frequência de 3 Hz.

Figura 45. Oscilograma de corrente e tensão da soldagem com alimentação dinâmica de arame com frequência de 3 Hz.

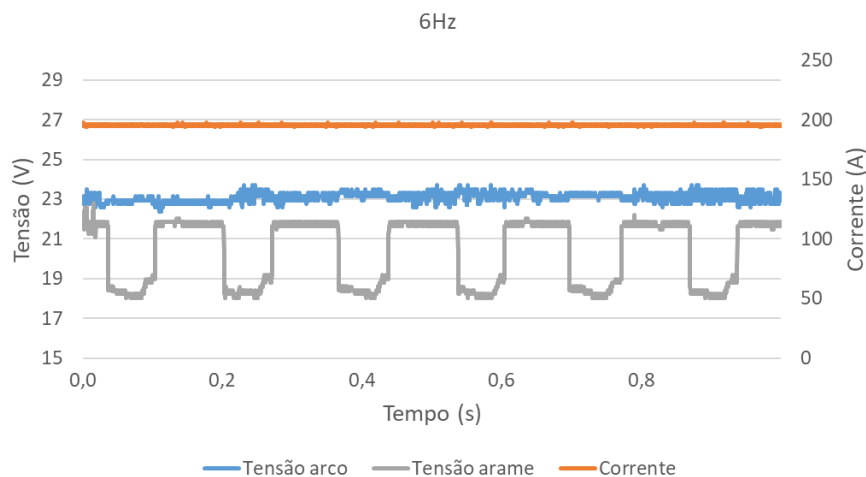


No oscilograma com alimentação dinâmica fica evidente a variação de tensão do arame ao longo do processo, no caso da soldagem com 3 Hz de frequência é possível verificar

que no tempo de 1 segundo houve 3 ciclos de entrada e saída do arame na poça de fusão, ilustrado na Figura 45. A tensão média do arame, considerando os valores obtidos dentro e fora da poça, foi de 20,5 V. A tensão do arco se mantém constante nos momentos em que o arame está em contato com a poça e apresenta alguma perturbação e valores ligeiramente superiores nos momentos em que o arame se afasta da poça, obtendo valor médio de 22,5 V, como pode ser observado na Figura 45. A corrente elétrica do processo se manteve estável com valor médio de 196 A. Analisando a aquisição completa foi possível constatar que o processo se manteve estável, entregando a frequência configurada no MAD.

A Figura 46 apresenta o oscilograma resultante da soldagem com 6 Hz de frequência de alimentação de arame. É possível observar a presença de 6 ciclos de oscilação do arame no período de 1 segundo, coincidindo com a frequência configurada.

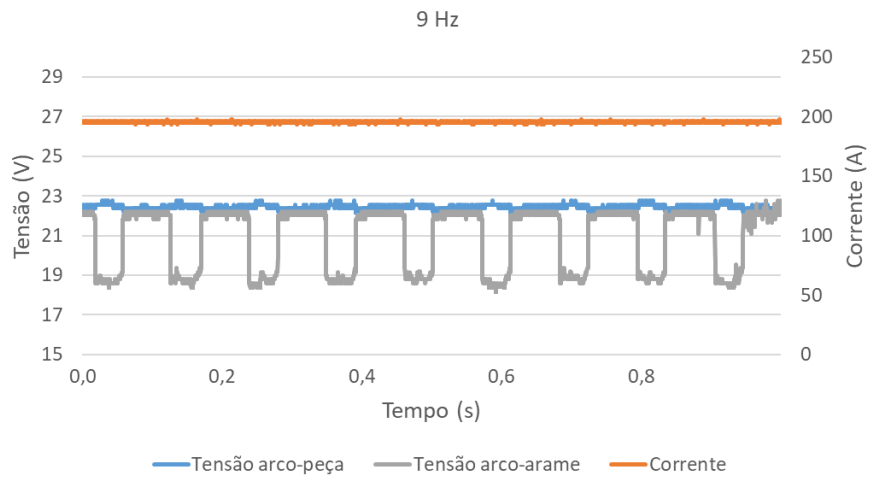
Figura 46. Oscilograma de corrente e tensão da soldagem com alimentação dinâmica de arame com frequência de 6 Hz.



Os valores médios de corrente e tensão do arame mantiveram-se muito próximos aos obtidos na soldagem com 3 Hz, 196 A e 20,6 V respectivamente. A tensão do arco manteve-se constante com alguns momentos de perturbação, coincidindo principalmente aos períodos de arame fora da poça de fusão, como pode ser observado na Figura 46. A tensão do arco foi, na média, 2,3 V superior à tensão do arame, apresentando valor médio de 22,9 V.

A Figura 47 expõe o oscilograma da soldagem com alimentação de arame com frequência de 9 Hz. É possível observar que a tensão do arco varia conforma a oscilação do arame, apresentando valor médio de 22,9 V.

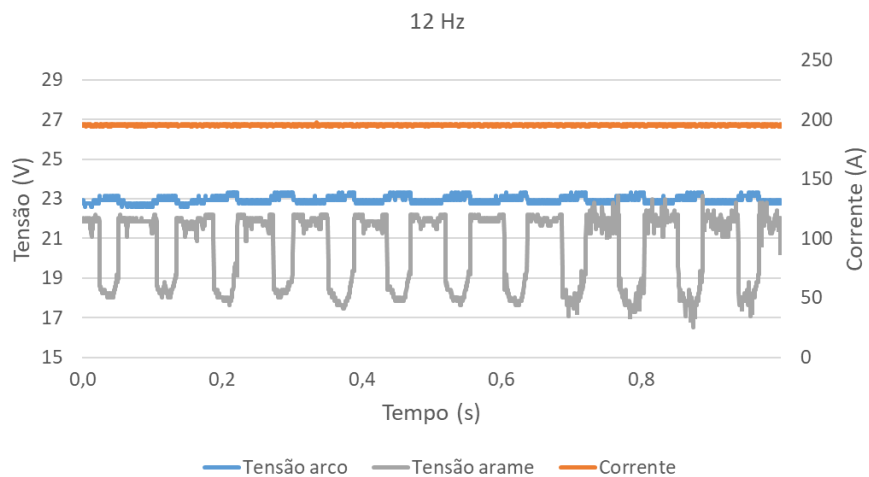
Figura 47. Oscilograma de corrente e tensão da soldagem com alimentação dinâmica de arame com frequência de 9 Hz.



A corrente elétrica se manteve constante em 196 A e a tensão do arame atingiu valores médios de 20,5 V, 2,4 V inferior à tensão média do arco.

A Figura 48 apresenta o oscilograma referente a soldagem com 12 Hz de frequência de alimentação de arame.

Figura 48. Oscilograma de corrente e tensão da soldagem com alimentação dinâmica de arame com frequência de 12 Hz.



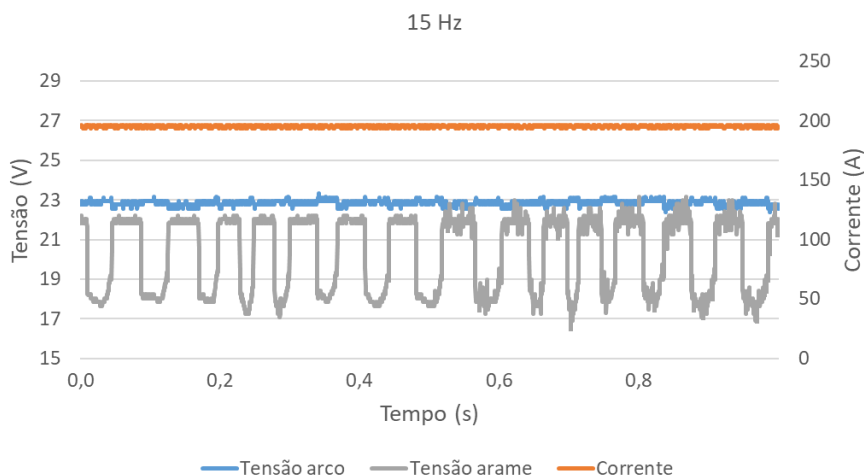
A partir dos dados apresentados na Figura 48 é possível observar que a variação de tensão do arco é sincronizada com a variação de tensão do arame, atingindo valores mais

altos, cerca de 23,3 V nos períodos de arame fora do arco, e valores mais baixos, de aproximadamente 22,5 V nos períodos do arame em contato com a poça. Este comportamento pode ser explicado pelo comprimento do arco, que é maior quando o arame está fora da poça (pois o arco incide diretamente sobre a peça sem influência do arame, ver Figura 75) acarretando conseqüentemente em maior tensão. Considerando estas variações, a tensão média do arco para a soldagem com alimentação dinâmica com frequência de 12 Hz foi de 23,1. A corrente média manteve-se constante em 195 A e a tensão média do arame, semelhante ao resultado das frequências anteriores, apresentou valor médio de 20,4 V.

Além disso, outra característica pode ser observada no oscilograma, a diferença entre a tensão do arco e a tensão do arame em ponte. A tensão do arame em ponte apresentou valores inferiores aos esperados (próximos a tensão do arco) e este comportamento se repete no oscilograma da soldagem com 6 Hz (Figura 46) e na soldagem com 15 Hz (Figura 49). Uma hipótese para este comportamento é o posicionamento do arame na poça durante a soldagem, que pode influenciar na distância em que o arame se encontra do eletrodo nos momentos de contato com a poça.

A Figura 49 expõe o oscilograma resultante da soldagem com 15 Hz de frequência de alimentação de arame.

Figura 49. Oscilograma de corrente e tensão da soldagem com alimentação dinâmica de arame com frequência de 15 Hz.



A partir dos resultados plotados em forma de oscilograma observa-se que os sinais elétricos se mantiveram estáveis, em ciclos definidos e sem variações aleatórias de tensão.

Para 12 Hz e 15 Hz é possível observar que a tensão do arame apresenta certo ruído, que ocorre de maneira periódica ao longo das aquisições. De maneira geral, é possível constatar que os oscilogramas de tensão podem ser usados como indicadores de estabilidade do processo. A partir das aquisições dos sinais elétricos as médias de tensão, corrente e potência foram calculadas para todas as configurações estudadas e o resultado pode ser visto na Tabela 8.

Tabela 8. Média das aquisições elétricas, tensão do arco, tensão arco-arame, corrente e potência para todas as frequências estudadas.

<b>Médias aquisições SAP</b>						
	<b>0 Hz</b>	<b>3Hz</b>	<b>6 Hz</b>	<b>9 Hz</b>	<b>12 Hz</b>	<b>15 Hz</b>
<b>Tensão arco (V)</b>	22,5	22,5	22,9	22,9	23,1	23,1
<b>Tensão arame (V)</b>	21,4	20,5	20,6	20,5	20,4	20,5
<b>Diferença tensão (V)</b>	1,1	2,0	2,3	2,4	2,7	2,6
<b>Corrente (A)</b>	196	196	196	196	195	195
<b>Potência (W)</b>	4425	4424	4494	4467	4525	4513

Outra análise realizada com o objetivo de caracterizar as diferentes frequências de alimentação de arame foi a medição do tempo em que o arame permanece dentro e fora da poça durante um ciclo. Quando o arame está dentro da poça, o arco atua sobre a poca fundida e sobre o arame e parte do calor é continuamente aproveitado para aquecer e fundir o arame. Na situação em que o arame está fora da poça, o arco ancora quase exclusivamente na poça (Figura 75). Devido a essa característica, na soldagem com alimentação contínua o arco está sempre atuando sobre o arame, enquanto na alimentação dinâmica os períodos oscilam. Este comportamento influencia diretamente na tensão do arco, como pode ser observados nos oscilogramas apresentados, e conseqüentemente na potência média do processo, atingindo valores ligeiramente mais altos para a alimentação dinâmica. Vale ressaltar que a soldagem com alimentação dinâmica nas frequências mais baixas, entre 3 Hz e 9 Hz, apresentaram pouca variação na tensão do arco durante a oscilação do arame e portanto, valores similares de potência média.

A Tabela 9 apresenta os tempos médios de permanência do arame dentro (em ponte) e fora da poça para todas as frequências estudadas.

Tabela 9. Média das aquisições elétricas, tensão do arco, tensão arco-aramé, corrente e potência para todas as frequências estudadas.

<b>Tempos médios do arame dentro e fora da poça</b>						
	<b>0 Hz</b>	<b>3 Hz</b>	<b>6 Hz</b>	<b>9 Hz</b>	<b>12 Hz</b>	<b>15Hz</b>
<b>Tempo em ponte por período</b>	1	0,196	0,097	0,069	0,050	0,039
<b>Tempo fora do arco por período</b>	0	0,138	0,070	0,042	0,034	0,028
<b>% em ponte por segundo</b>	100	58,6	55,8	62,6	59,8	59,1
<b>% fora da poça por segundo</b>	0	41,3	44,1	37,5	40,2	40,9

Para a alimentação contínua, o arame se mantém dentro da poça durante todo o processo, mas para as demais frequências há uma variação do tempo de arame em ponte que vai de 55,8%, para soldagem com 6 Hz, a 62,6% observado na soldagem com frequência de 9 Hz. Já o tempo de arame fora da poça variou de 37,5% na alimentação de 9 Hz até 44,1% com 6 Hz de alimentação dinâmica de arame. Como esperado, os tempos por ciclo de arame em ponte ou fora do arco foram diminuindo com o aumento da frequência, já que há mais ciclos por segundo. Como consequência do aumento da frequência, há o aumento da velocidade de aproximação e recuo do arame em relação à poça fornecida pelo movimento do alimentador de arame.

A etapa de medição da velocidade de arame do processo com alimentação dinâmica de arame foi realizada com o encoder. Com esta informação é possível certificar se a velocidade regulada foi respeitada, além de identificar as causas de problemas que comprometam a alimentação e, conseqüentemente, a estabilidade. Na soldagem com alimentação contínua de arame, como já discutido anteriormente, o arame é alimentado de maneira contínua com a velocidade programada, neste caso, 1,7 m/min. Porém, o resultado obtido na aquisição da velocidade ao longo do tempo apresentou algumas oscilações, com média de 1,8 m/min, como pode ser visto na Figura 50.

Figura 50. Gráfico da velocidade x tempo da soldagem com alimentação contínua de arame.



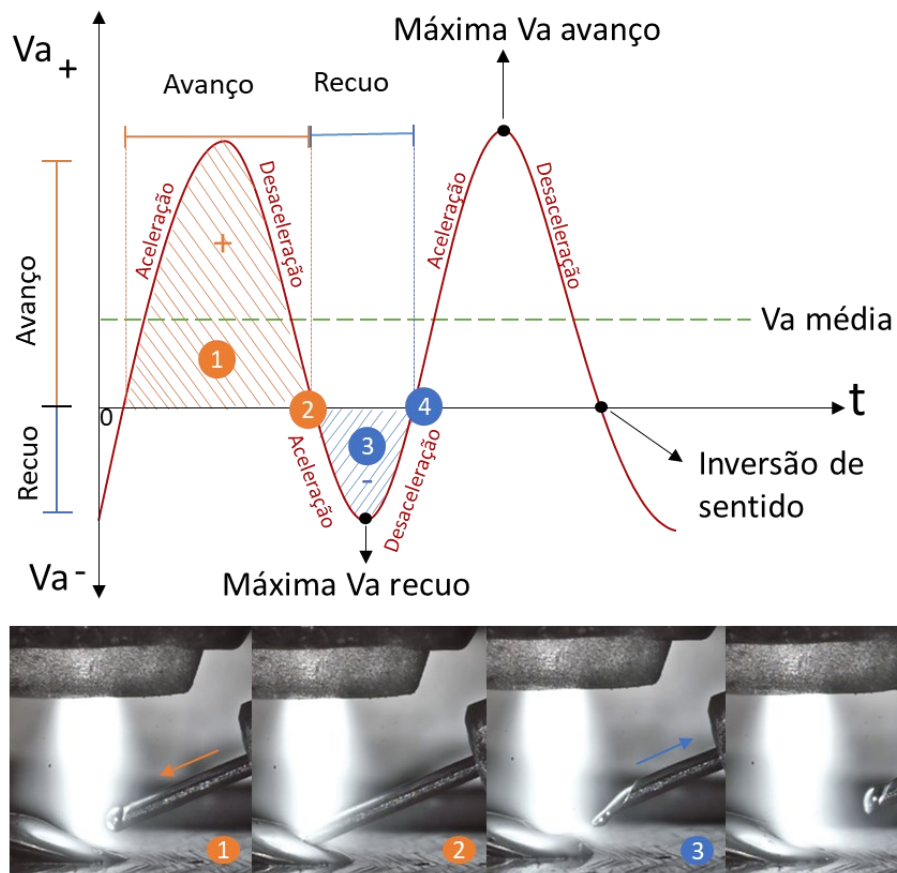
A variação observada na velocidade de arame pode ser atribuída a alguns fatores relacionados às condições de contato entre o arame e o conduíte, tais como folgas e atrito, e a dinâmica dos roletes tracionadores. Essa oscilação, quando muito acentuada, pode resultar na mudança do modo de transferência metálica do processo, de ponte contínua para ponte intermitente e vice-versa. Como consequência, a variação no modo de transferência de forma imprevisível afeta a estabilidade e a repetibilidade do processo.

A soldagem com alimentação contínua de arame foi parametrizada neste trabalho para o modo de transferência metálica em ponte contínua. Durante os testes foi possível perceber que a alimentação se manteve em ponte ao longo da soldagem mesmo com as oscilações de velocidade de alimentação de arame apresentadas na Figura 50.

Na soldagem com alimentação dinâmica, o patamar de avanço encontra-se na região positiva do gráfico e o de recuo na região negativa. No entanto, na prática, a velocidade não atinge os patamares instantaneamente e o arame permanece parado por um tempo antes de inverter o sentido de alimentação. A Figura 51 apresenta um gráfico idealizado de velocidade de arame na alimentação dinâmica correlacionando com o movimento do arame.

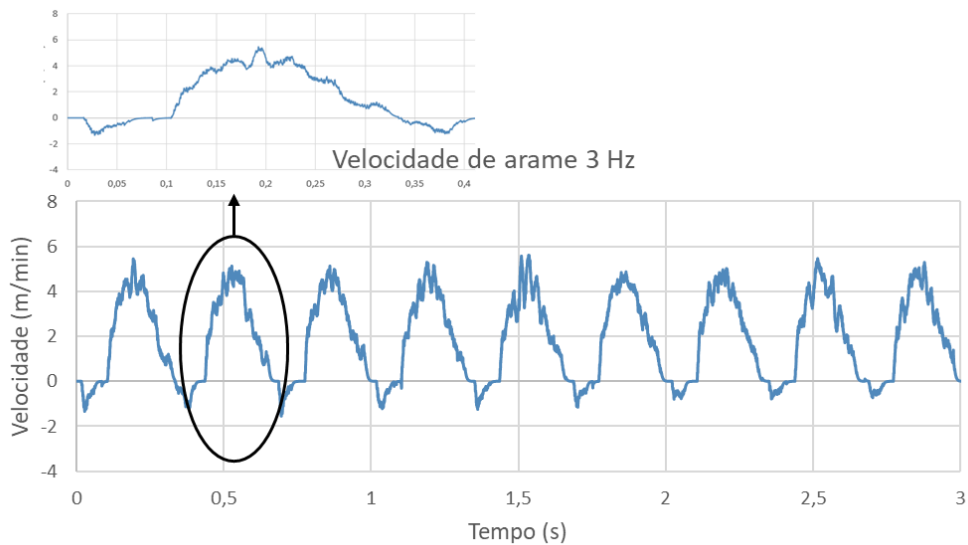


Figura 51. Gráfico esquemático correlacionando a velocidade e o movimento do arame nos períodos de avanço e recuo.



A Figura 52 apresenta o gráfico da velocidade em função do tempo para a frequência de 3 Hz, obtido utilizando o transdutor de velocidade dedicado.

Figura 52. Gráfico velocidade x tempo para soldagem com alimentação dinâmica de 3 Hz. Em detalhe o comportamento do arame no tempo de 0,5 segundos.



A velocidade máxima atingida pelo arame na alimentação dinâmica é a soma da velocidade de alimentação e da velocidade do movimento mecânico de avanço realizado pelo bloco de roletes, que varia de acordo com a frequência e amplitude configuradas. De forma análoga, a velocidade máxima de recuo do arame é a velocidade de recuo mecânico realizada pelo alimentador menos a velocidade de alimentação configurada. Sendo assim, a velocidade de avanço do arame será sempre superior à velocidade de recuo.

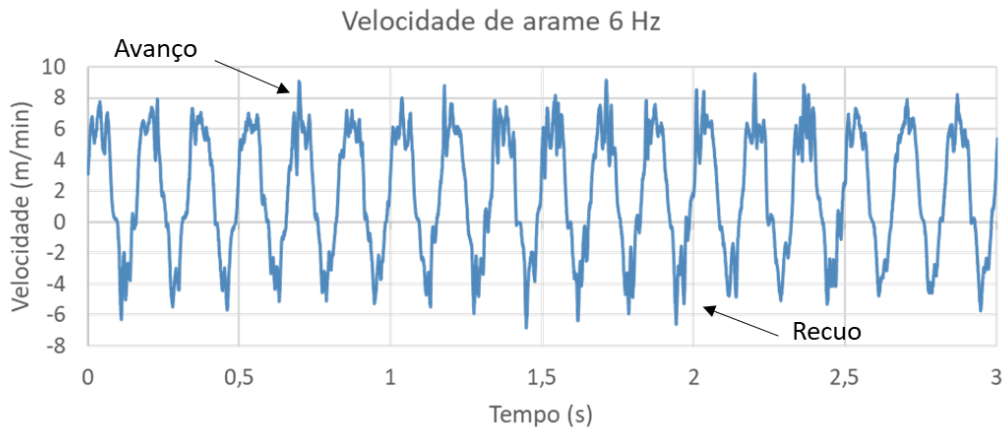
Para a frequência de 3 Hz, apresentada na Figura 52, a velocidade máxima de avanço atingida foi de 5,9 m/min e a velocidade máxima de recuo foi de 1,3 m/min. A Tabela 10 apresenta os valores de velocidade máxima, mínima e média para todas as frequências utilizadas nos testes.

Tabela 10. Valores de velocidade de arame máxima, mínima e média para as diferentes frequências.

	Velocidades de arame (m/min)					
	0 Hz	3 Hz	6 Hz	9 Hz	12 Hz	15 Hz
<b>Velocidade alimentação média</b>	1,8	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9
<b>Velocidade de avanço média</b>	0,4	2,7	4,6	6,6	7,7	9,7
<b>Velocidade de avanço máxima</b>	3,1	5,9	9,0	12,6	16,1	18,0
<b>Velocidade de recuo média</b>	-	0,3	2,5	4,3	6,4	7,5
<b>Velocidade de recuo máxima</b>	-	1,3	5,5	8,7	15,6	13,5

Com o aumento da frequência ocorre conseqüentemente o aumento da velocidade de avanço e de recuo do arame oriundo do aumento da velocidade do bloco de roletes, que precisa cumprir mais ciclos por segundo. A Figura 53 mostra o comportamento de avanço e recuo do arame para a frequência de 6 Hz.

Figura 53. Gráfico velocidade x tempo para soldagem com alimentação dinâmica de 6 Hz.



Outra característica importante que pode ser observada nos gráficos de velocidade de arame, no que diz respeito à estabilidade do processo é que ao longo da soldagem, para a mesma frequência, as velocidades máximas de avanço (picos positivos) apresentam valores similares. De forma análoga, os valores de velocidade máxima de recuo atingidas (picos negativo) apresentam valores similares. Esse comportamento é evidenciado pelo formato da onda dos gráficos, em que todos os picos de avanço e recuo de cada ciclo encontram-se no mesmo patamar, formando o que se assemelha a uma faixa ao longo do tempo. Essa constância de picos de velocidades máximas de avanço e recuo podem ser usadas como um indicador de estabilidade da velocidade de arame ao longo do processo. Vale ressaltar que a estabilidade da alimentação dinâmica de arame não é sinônimo de um processo estável ou de um cordão íntegro e homogêneo. A Figura 54, Figura 55 e Figura 56 apresentam o resultado da velocidade de arame para as frequências de 9 Hz, 12 Hz e 15 Hz, respectivamente.

Figura 54. Gráfico velocidade x tempo para soldagem com alimentação dinâmica de 9 Hz.

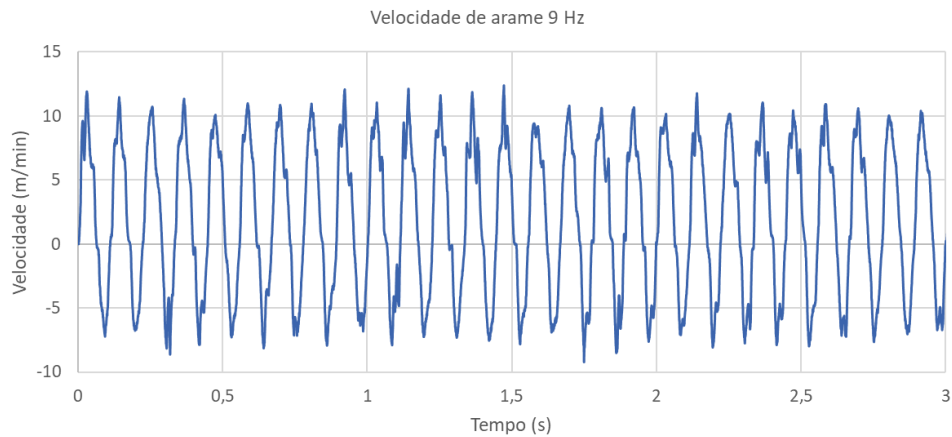


Figura 55. Gráfico velocidade x tempo para soldagem com alimentação dinâmica de 12 Hz.

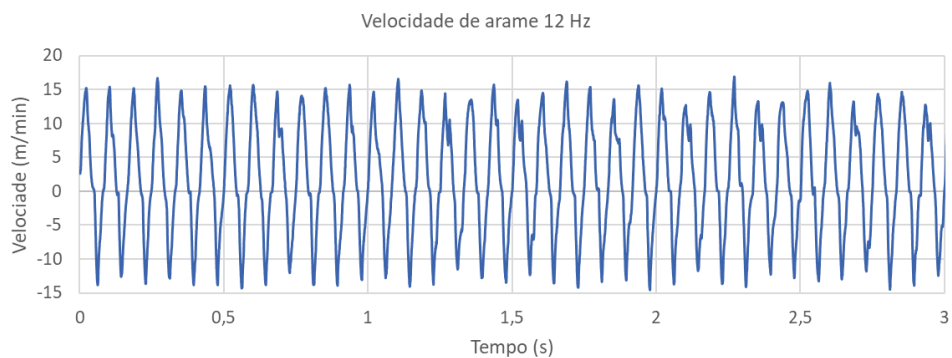
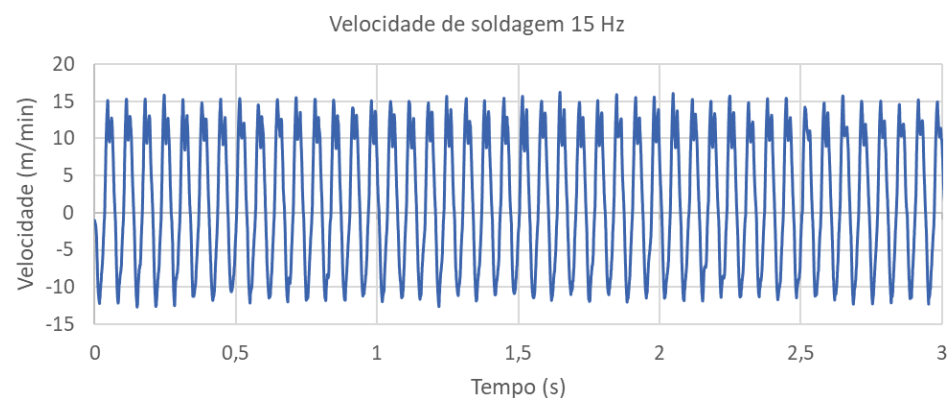


Figura 56. Gráfico velocidade x tempo para soldagem com alimentação dinâmica de 15 Hz.

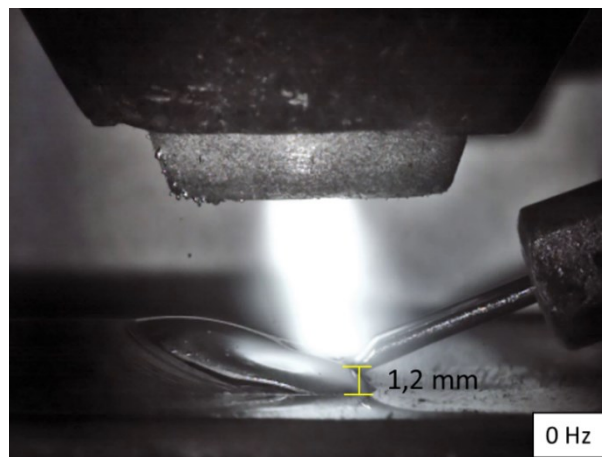


Além da análise dos dados elétricos adquiridos durante o processo de soldagem, foram analisadas as filmagens em alta velocidade de alguns ciclos de cada uma das frequências estudadas. O objetivo foi verificar o processo com mais detalhes, observando a

transferência metálica e o comportamento da poça. Os vídeos podem ser acessados nos links disponíveis nas legendas das fotos.

Na soldagem com alimentação contínua de arame foi possível observar que o arame fica submerso na poça durante todo o processo, complementando o resultado de tensão obtido. Além disso, foi possível inferir das imagens que a poça de fusão tem pouca agitação e se mantém estável ao longo do processo. A Figura 57 foi retirada do vídeo da soldagem com alimentação contínua de arame e apresenta a vista lateral da poça de fusão e do arame.

Figura 57. Imagem da soldagem com alimentação contínua de arame obtida pela filmagem de alta velocidade. [Vídeo](#)

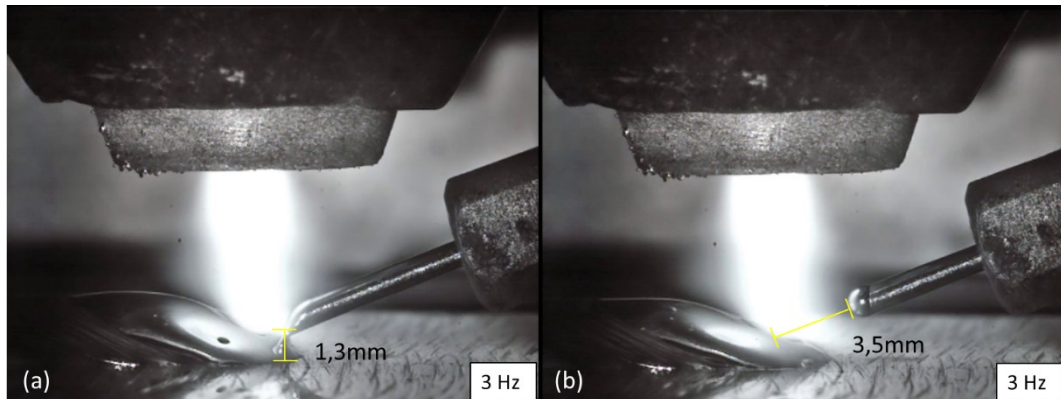


Como pode ser observado na Figura 57, o arame está em constante contato com a poça de fusão, a uma altura de aproximadamente 1,2 mm da superfície da chapa. Por não haver o movimento de entrada e saída do arame, a poça permanece sem muita movimentação ao longo do processo.

Na filmagem da soldagem com frequência de 3 Hz, foi possível observar com mais detalhes o movimento do arame e da poça. Como explicado na metodologia, a amplitude usada em todos os testes foi de 5 mm e através da filmagem foi possível medir a distância de recuo efetiva do arame. Para a frequência de 3 Hz a distância de recuo do arame foi de 3,5 mm. A altura máxima da poça foi de 1,3 mm quando o arame sai da poça no movimento de recuo e rompimento iminente da ponte metálica. A Figura 58 apresenta a imagem do momento em que o arame está saindo da poça de fusão (a) e o momento do recuo total do arame (b). Vale ressaltar que as medições de altura da ponte metálica foram realizadas para fins de

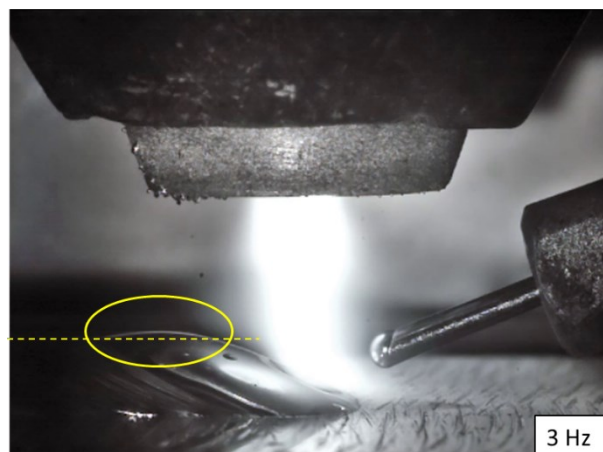
comparação utilizando a base da poça como referência, visto que é difícil definir exatamente a superfície da chapa por conta da perspectiva da imagem.

Figura 58. Imagens da soldagem com frequência de oscilação de arame de 3 Hz. (a) Momento em que o arame está em movimento de recuo da poça instantes antes do rompimento da ponte entre a ponta do arame e a poça. (b) Arame em posição de recuo total. [Vídeo](#)



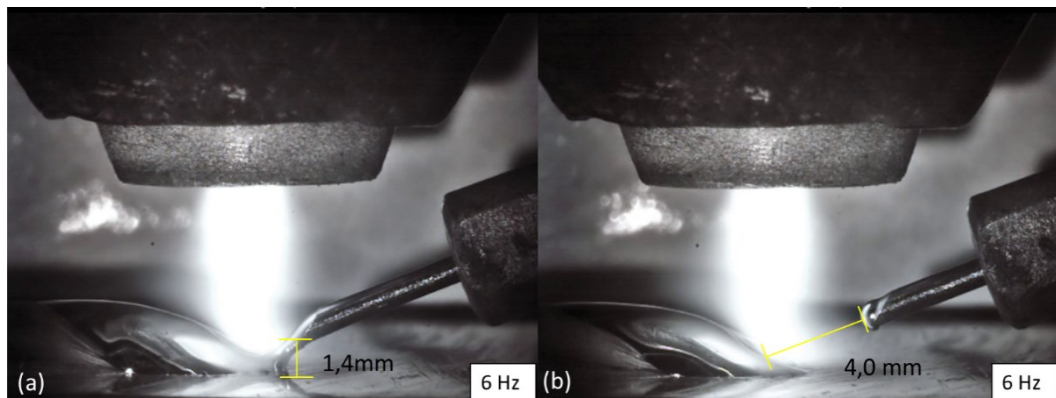
Durante a análise da filmagem foi possível observar, como consequência do movimento de avanço e recuo do arame, que há movimentação da poça, ainda que discreta e lenta. A cada ciclo foi possível constatar que uma porção de metal líquido atinge a parte superior da poça durante o movimento, sobresaindo uma parte para cima da altura do cordão já solidificado na região posterior da poça (acima da linha amarela, Figura 59). A Figura 59 apresenta o momento em que a poça atinge altura maior que a do cordão já solidificado para a frequência de 3 Hz.

Figura 59. Momento em que uma porção de metal líquido está no topo da poça a uma altura maior que o cordão já solidificado. Soldagem com frequência de 3 Hz. [Vídeo](#)



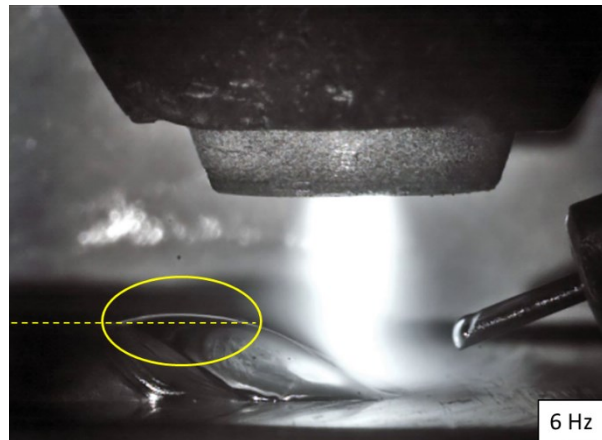
Na soldagem com frequência de oscilação de arame de 6 Hz a altura máxima da poça puxada pelo arame durante o movimento de recuo foi de 1,4 mm, valor ligeiramente maior do que o encontrado na soldagem com 3 Hz. Nota-se que o aumento da altura em que a poça é puxada pelo arame está relacionado com o maior alongamento da ponte metálica antes do rompimento. O comprimento do recuo total de arame foi 4,0 mm, novamente menor que a amplitude definida antes de iniciar o processo, porém 0,5 mm maior que o valor encontrado na soldagem com 3 Hz. A Figura 60 apresenta a imagem do momento em que o arame está saindo da poça de fusão (a) e o momento do recuo total do arame (b).

Figura 60. Imagens da soldagem com frequência de oscilação de arame de 6 Hz. (a) Momento em que o arame está em movimento de recuo da poça instantes antes do rompimento da ponte entre a ponta do arame e a poça. (b) Arame em posição de recuo total. [Vídeo](#)



Como constatado na frequência de 3 Hz, na soldagem com 6 Hz também há uma agitação da poça causada pelo movimento oscilatório de arame e novamente é possível observar que durante a movimentação da poça, uma vez a cada período, uma porção de metal líquido se desloca acima do nível do cordão já solidificado atingindo um valor máximo de 0,5 mm, como é apresentado na Figura 61.

Figura 61. Momento em que uma porção de metal líquido está no topo da poça a uma altura maior que o cordão já solidificado. Soldagem com frequência de 6 Hz. [Vídeo](#)

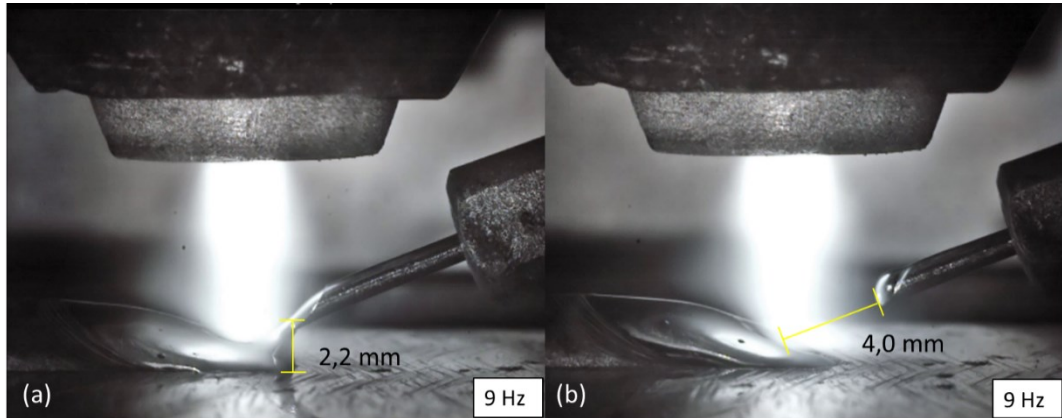


Após a saída do arame e o rompimento da ponte, a porção líquida de metal da poça movimenta-se para o lado oposto, e um pequeno volume de material sobe a uma altura superior à do cordão já solidificado, região superior a linha amarela na Figura 61.

Na soldagem com 9 Hz de frequência de oscilação de arame, o arame em seu movimento de recuo forma uma ponte mais alongada e puxa a porção de metal líquido a uma altura de 2,2 mm, como pode ser visto na Figura 62, valor superior aos observados nas frequências menores. Uma possível explicação para este fenômeno pode estar relacionada com o aumento da velocidade com que o arame deixa a poça. A aceleração aumenta com o aumento da frequência, visto que o arame atinge velocidades mais altas em menos tempo. Para 3 Hz, por exemplo, a aceleração de recuo do arame é de  $0,3 \text{ m/s}^2$ , já para a frequência de 9 Hz a aceleração de recuo é de  $8,6 \text{ m/s}^2$ . Considerando que a massa de arame deslocada dentro do conduíte seja constante, a força com que o arame puxa o metal líquido é maior para frequências mais elevadas, visto que a aceleração de recuo do arame foi maior para a frequência de 9 Hz. O comprimento do recuo total do arame manteve-se em 4,0 mm.



Figura 62. Imagens da soldagem com frequência de oscilação de arame de 9 Hz. (a) Momento em que o arame está em movimento de recuo da poça instantes antes do rompimento da ponte entre a ponta do arame e a poça. (b) Arame em posição de recuo total. [Vídeo](#)



Novamente, como consequência da agitação da poça, após o rompimento da ponte metálica no movimento de recuo do arame, há intensa movimentação da poça ocasionando o deslocamento de material para níveis superiores ao cordão já solidificado a cada ciclo. O valor máximo encontrado de ricochete foi de 0,6 mm acima da altura do cordão, como mostra a Figura 63.

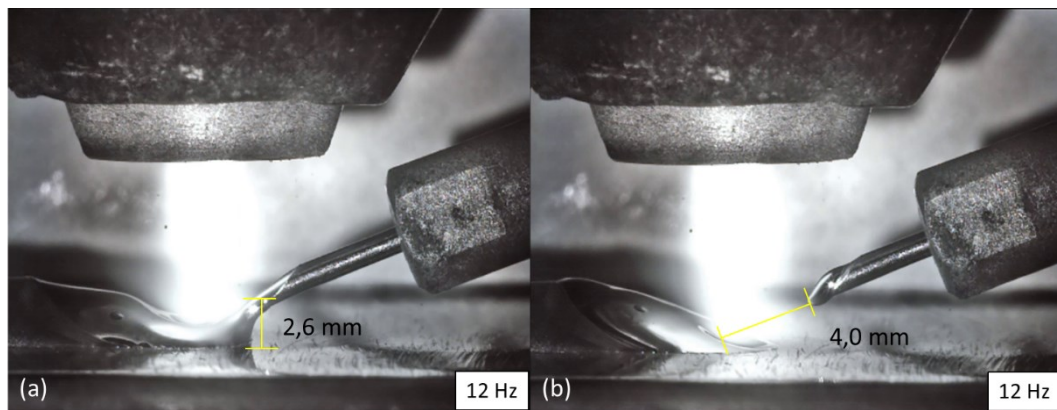
Figura 63. Momento em que uma porção de metal líquido está no topo da poça a uma altura maior que o cordão já solidificado. Soldagem com frequência de 9 Hz. [Vídeo](#)



Com o aumento da velocidade de avanço e recuo do arame, na soldagem com 12 Hz foi observada uma intensa e rápida movimentação do metal líquido da poça, e um aumento do alongamento da ponte e da altura em que o arame em seu movimento de recuo puxa a poça

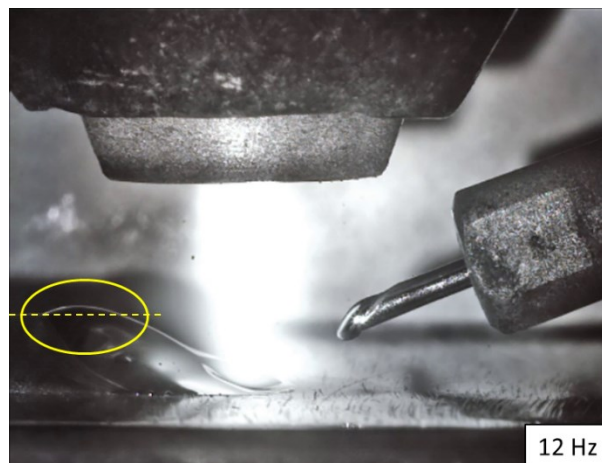
por tensão superficial, atingindo 2,6 mm de altura antes da ruptura da ponte. O recuo máximo apresentado nessa frequência se manteve em 4,0 mm. Os resultados são apresentados na Figura 64.

Figura 64. Imagens da soldagem com frequência de oscilação de arame de 12 Hz. (a) Momento em que o arame está em movimento de recuo da poça instantes antes do rompimento da ponte entre a ponta do arame e a poça. (b) Arame em posição de recuo total. [Vídeo](#)



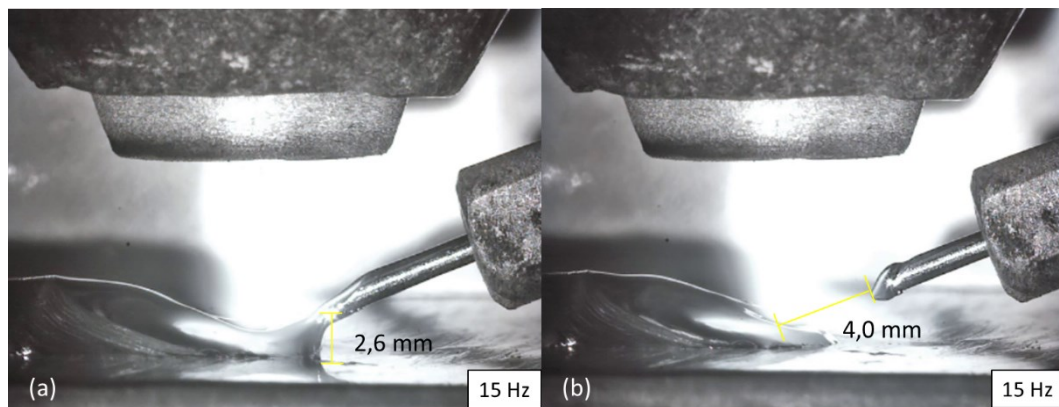
De forma análoga ao que ocorre nas demais frequências, após o rompimento da ponte metálica, em um movimento de reação à força do arame puxando por tensão superficial a poça, uma porção de material líquido desloca-se para a parte posterior da poça, escalando o cordão á solidificado. O valor de altura máxima observada foi de 0,7 mm acima da altura do cordão, como mostra a Figura 65.

Figura 65. Momento em que uma porção de metal líquido está no topo da poça a uma altura maior que o cordão já solidificado. Soldagem com frequência de 12 Hz. [Vídeo](#)



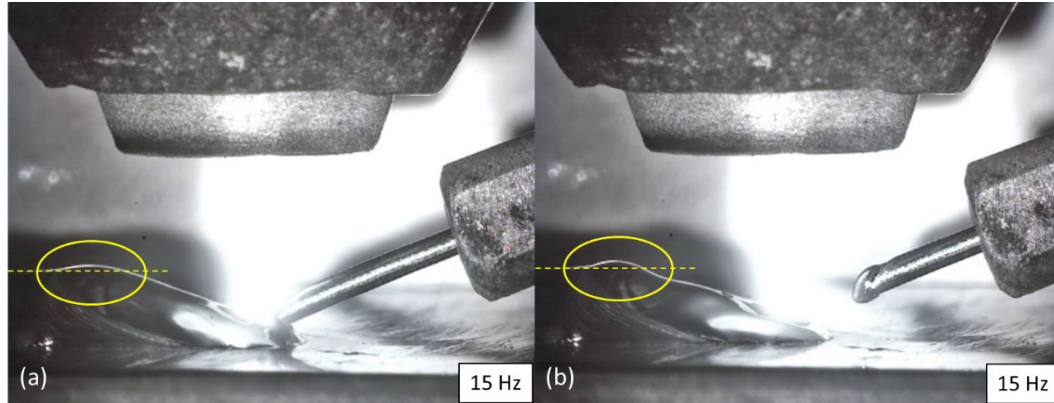
Na soldagem com 15 Hz de frequência de alimentação observou-se novamente o alongamento da ponte metálica antes do rompimento, atingindo 2,6 mm de altura, como exibido na Figura 66 (a). Em concordância com as frequências 6 Hz, 9 Hz e 12 Hz, a amplitude resultante foi de 4,0 mm (Figura 66 (b)).

Figura 66. Imagens da soldagem com frequência de oscilação de arame de 15 Hz. (a) Momento em que o arame está em movimento de recuo da poça instantes antes do rompimento da ponte entre a ponta do arame e a poça. (b) Arame em posição de recuo total. [Vídeo](#)



Diferente das frequências mais baixas, na soldagem com 15 Hz o fenômeno de movimentação de material líquido para a parte posterior da poça acontece em dois momentos no mesmo ciclo. A maior frequência de oscilação do arame e conseqüentemente maior velocidade, causa o aumento da velocidade de agitação da poça. Essa agitação mais acentuada faz com que ocorra duas vezes em um mesmo ciclo o movimento de uma porção do metal líquido para níveis acima do cordão já solidificado, como mostrado na Figura 67. No primeiro momento em que isto ocorre o arame está dentro da poça e o movimento é de menor intensidade e no segundo momento, assim como ocorre nas frequências mais baixas, ocorre após o rompimento da ponte metálica, atingindo valores de 0,4 mm.

Figura 67. Momentos em que uma porção de metal líquido está no topo da poça a uma altura maior que o cordão já solidificado. (a) primeira ocorrência, com arame dentro da poça (b) Segunda ocorrência, após o rompimento da ponte metálica. Soldagem com frequência de 15 Hz. [Vídeo](#)

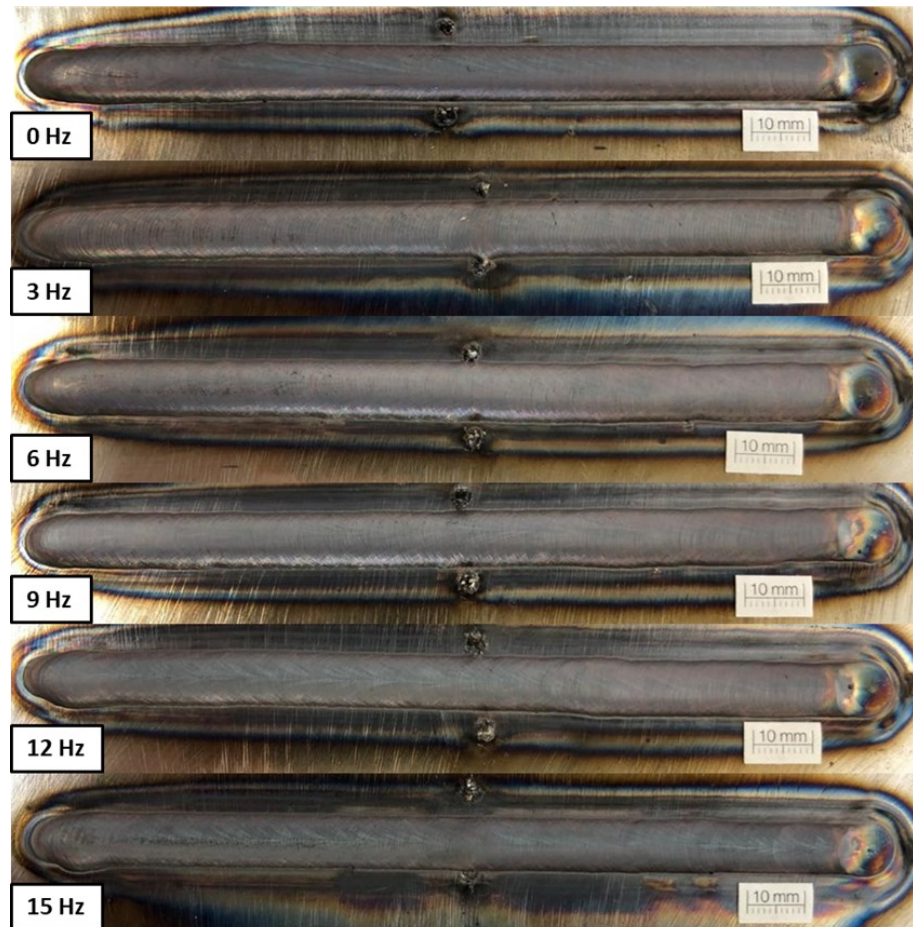


Os resultados obtidos sugerem que além do movimento do arame puxando a poça de fusão e favorecendo menor largura e molhabilidade do cordão, a movimentação de material líquido da poça a níveis acima do cordão já solidificado também pode influenciar na geometria final do cordão. Os resultados são importantes para caracterizar o comportamento da poça e do arame durante o processo e entender a influência da oscilação do arame nos resultados geométricos, térmicos e microestruturais dos cordões e paredes. Riffel et al. [10] também observaram em seus estudos a presença da ponte metálica durante o movimento de recuo de arame na alimentação dinâmica e, segundo eles, este fenômeno tem influência na geometria e diluição dos cordões, porém, eles não mencionam o deslocamento de material líquido para a parte posterior da poça.

#### 4.1.2 Análise geométrica

O estudo da geometria dos cordões soldados começou pela análise visual, com o objetivo de avaliar a repetibilidade dos cordões, a qualidade da superfície dos cordões, e identificar a presença de alguma possível irregularidade geométrica ou descontinuidade do cordão. A Figura 68 apresenta o resultado dos cordões soldados nas diferentes frequências estudadas.

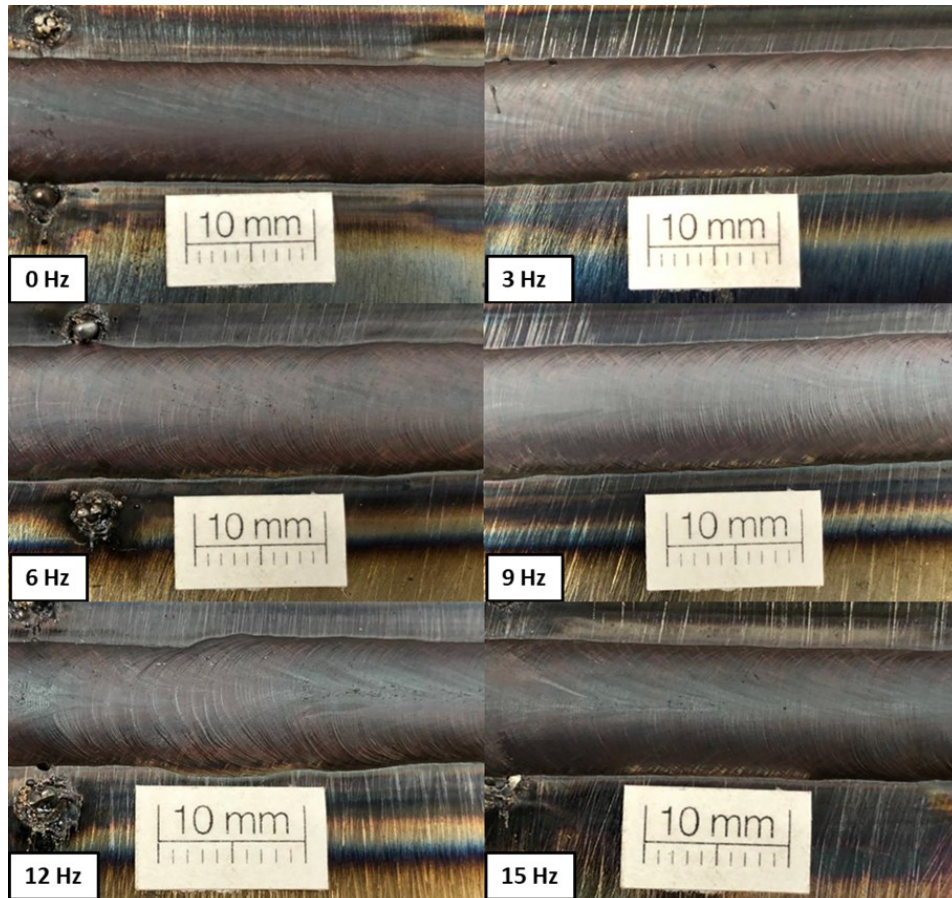
Figura 68. Resultado dos cordões soldados para as diferentes frequências de alimentação de arame.



Todos os três cordões soldados para cada frequência foram visualmente semelhantes quanto à largura, altura e apresentaram bordas homogêneas e retilíneas, demonstrando, de maneira geral, uma repetibilidade do processo para todas as condições. Além disso, todos os ensaios resultaram em cordões íntegros, apresentando uma homogeneidade de deposição ao longo do cordão e ausência de defeitos, como porosidade e *humping*, por exemplo.

Quando se analisa visualmente a superfície dos cordões é possível observar a existência de escamas de solidificação nos cordões soldados com alimentação dinâmica de arame e uma aparência mais lisa no cordão com alimentação contínua de arame. Nos cordões soldados com frequências mais baixas, como 3Hz, as escamas presentes estão mais espaçadas entre si, e eles ficam mais próximos à medida que a frequência de alimentação aumenta, como pode ser visto em mais detalhes na Figura 69.

Figura 69. Superfície dos cordões soldados.



A diferença na quantidade de escamas está diretamente relacionada com a quantidade de vezes que o arame entra e sai da poça durante a soldagem, deixando marcas de solidificação causadas pelo agitação da poça. Durante a soldagem de um dos cordões com a frequência de 12 Hz, ocorreu uma adversidade em que o MAD desacelerou, como se fosse parar de alimentar de forma dinâmica o arame, e depois de alguns segundos voltou a acelerar e entregar a frequência de 12 Hz. Ao analisar o cordão resultante, Figura 69, é possível perceber que o cordão ficou mais largo na parte em que o MAD desacelerou até quase parar e voltou a estreitar quando a alimentação se regularizou novamente em 12 Hz. Este comportamento mostrou-se como um indício de que o cordão tende a apresentar um perfil mais largo em baixas frequências e mais estreito em frequências mais altas.

Após a análise visual, os cordões foram seccionados transversalmente conforme descrito na metodologia, com o objetivo de realizar as medições de geometria dos cordões, como altura, largura, área e diluição. Para isso, após os cortes as amostras foram lixadas, polidas e receberam ataque químico para posteriormente serem fotografadas. A Figura 70 apresenta os cordões seccionados no início, meio e final para todas as frequências estudadas.

Figura 70. Resultados do corte transversal dos cordões para as diferentes frequências de alimentação de arame.



A partir das imagens é possível constatar que na alimentação contínua de arame houve maior penetração nas bordas do cordão, e menor penetração de material no centro. À medida que a alimentação dinâmica foi inserida, em 3 Hz, 6 Hz e 9 Hz o perfil da área diluída tornou-se mais reto porém apresentando ainda acúmulo de material nas bordas, principalmente para soldagem com 9 Hz. Ao analisar a seção transversal dos cordões soldados

com 12 Hz e 15 Hz é possível perceber uma penetração mais uniforme de material na área diluída, tanto nas bordas como no centro do cordão, adotando um perfil mais simétrico. Além disso, os cordões realizados com as frequências de 12 Hz e 15 Hz apresentaram reforço com perfil triangular, maior altura e menor largura do que os outros cordões. A Tabela 11 contém os valores médios das grandezas medidas a partir das imagens dos cortes transversais e os valores médios da área da poça obtidos na filmagem de alta velocidade.

Tabela 11. Valores médios de altura, largura, área total, área diluída e diluição para todas as frequências estudadas

-	0 Hz	3 Hz	6 Hz	9 Hz	12 Hz	15 Hz
<b>Altura (mm)</b>	2,41 ± 0,07	2,35 ± 0,10	2,32 ± 0,14	2,46 ± 0,12	2,6 ± 0,47	2,58 ± 0,34
<b>Largura (mm)</b>	9,43 ± 0,50	9,59 ± 0,32	9,75 ± 0,52	9,62 ± 0,43	9,02 ± 0,74	9,37 ± 0,76
<b>Área fundida total (mm<sup>2</sup>)</b>	17,88 ± 1,74	19,90 ± 1,13	19,10 ± 1,71	19,61 ± 1,39	19,15 ± 1,30	19,90 ± 0,79
<b>Área penetração (mm<sup>2</sup>)</b>	1,98 ± 1,00	3,86 ± 0,50	3,33 ± 1,41	3,13 ± 0,72	3,14 ± 0,50	3,29 ± 1,07
<b>Diluição (%)</b>	11,00 ± 4,48	19,41 ± 1,96	17,31 ± 6,19	15,94 ± 2,99	16,40 ± 2,54	16,52 ± 5,13

Como esperado pela diferença de largura do cordão quando houve falha no movimento de oscilação do MAD, a alimentação contínua de arame e em frequências até 9 Hz apresentaram uma largura de cordão maior quando comparado com as frequências mais altas, 12 Hz e 15 Hz. Por outro lado, a altura dos cordões soldados com as duas frequências mais altas foram ligeiramente superiores às encontradas na alimentação contínua de arame. Estes resultados de geometria triangular para elevadas frequências e de maior homogeneidade na área diluída corroboram com os resultados geométricos obtidos por Riffel et al. [10] na soldagem com alimentação dinâmica em frequência de 18 Hz no processo TIG.

Se analisarmos a potência dos processos (Tabela 9), os resultados obtidos são o oposto do esperado, pois para maiores potências (12 Hz e 15 Hz) usualmente os cordões apresentariam maior molhabilidade, largura e menor altura. Na alimentação dinâmica, o movimento de retrocesso do arame “puxa” uma porção de metal líquido da poça devido à tensão superficial. Esse movimento para cima faz com que o cordão tenda a ser mais convexo, apresentar menor largura e molhabilidade. Aliado a isso, a intensa movimentação da poça conduz uma porção de metal líquido como uma onda para a parte posterior da poça, subindo a níveis acima do cordão já solidificado. Desta forma, mesmo para valores de potência média mais altos os cordões resultantes da alimentação dinâmica tendem a apresentar altura igual ou



superior às obtidas com a alimentação contínua de arame. De maneira geral, para aplicações na manufatura aditiva, é desejável a repetibilidade dos cordões ao longo das camadas, com valores de altura e largura com baixo desvio padrão. Pela Tabela 12 é possível constatar que as soldagens com maiores frequências apresentaram maior desvio padrão, podendo ser prejudicial na construção das paredes. A maior variação de geometria entre os cordões de alta frequência pode estar relacionada à maior agitação da poça.

Outro resultado importante apresentado na Tabela 12 é a diluição, que foi menor para os cordões soldados com alimentação contínua de arame. Pelas observações da filmagem, a condição de alimentação contínua de arame foi mesmo a que resultou em menor agitação da poça. E esse movimento da poça (em analogia com o próprio efeito Marangoni) poderia ser o principal motivo para as diferentes penetrações. Por outro lado, a maior diluição ocorreu na soldagem com alimentação em 3 Hz, que apresentou valor de potência média igual aos ensaios com alimentação contínua de arame. Este resultado se opõe ao esperado, porém, uma possível explicação é a oscilação da potência por períodos mais longos em relação às frequências mais altas. A variação da potência nos momentos de arame dentro e fora do arco pode influenciar no perfil de diluição, atingindo valores maiores quando o arame está fora da poça e menores quando o arame está dentro da poça. A hipótese é que a região em que os cortes foram realizados podem ter coincidido com os períodos de potência mais elevada.

### 4.1.3 Análise térmica

Como descrito na metodologia, os dados dos termopares obtidos no SAT foram exportados para o excel para plotar os gráficos de temperatura. Mesmo utilizando a metodologia de cálculo da distância entre a borda do cordão e o termopar para realizar a soldagem dos termopares, foi constatado após a soldagem dos cordões que houve variação da distância do termopar para a borda do cordão, variando de 2 a 3 mm. Essa variação torna difícil a comparação direta entre os resultados, visto que as condições não foram as mesmas e que, o gradiente de temperatura varia com a distância da fonte de calor. A Figura 71 apresenta as curvas de temperatura obtidas através dos termopares para todas as frequências e a Tabela 12 exibe as máximas temperaturas obtidas para cada frequência e a respectiva distância entre o termopar e a borda dos cordões soldados.

Figura 71. Curvas de temperatura obtidas através de termopares.

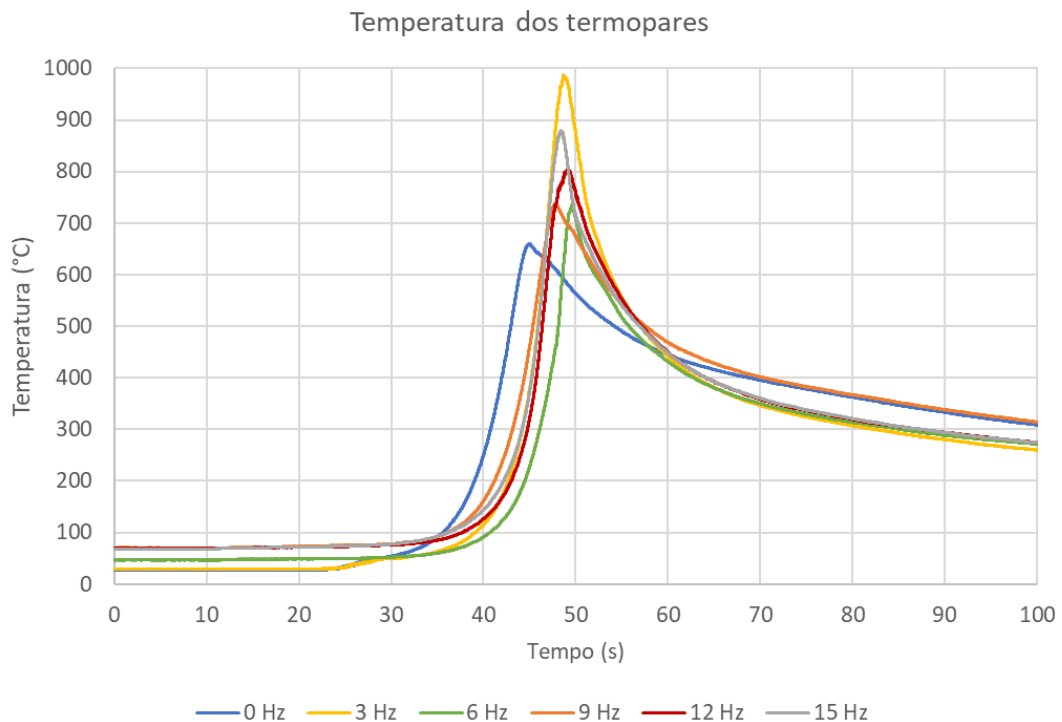


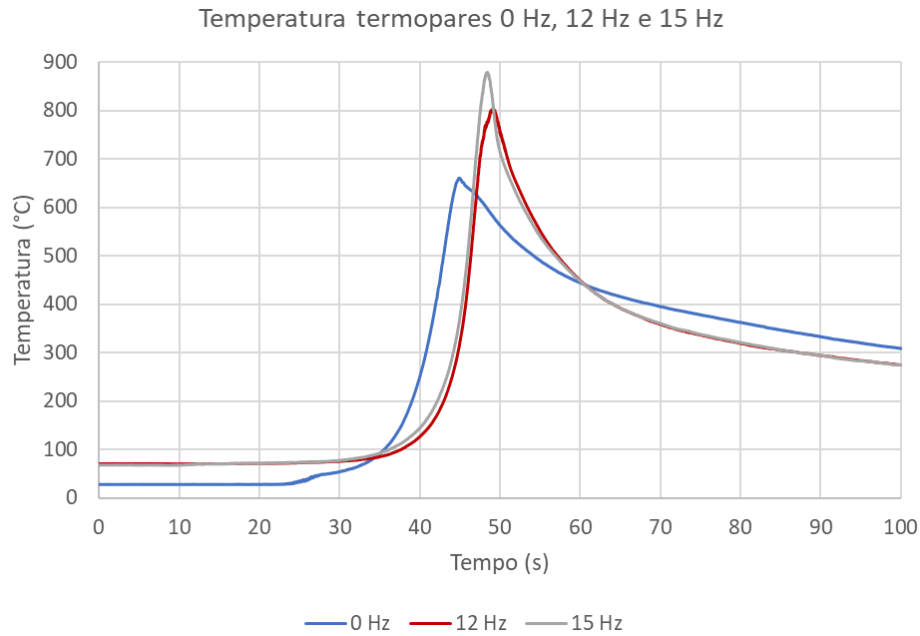
Tabela 12. Máximas temperaturas atingidas pelo termopar com a respectiva distância entre o termopar e a borda do cordão soldado.

	<b>0 Hz</b>	<b>3 Hz</b>	<b>6 Hz</b>	<b>9 Hz</b>	<b>12 Hz</b>	<b>15 Hz</b>
<b>Temperaturas Máximas (°C)</b>	660,7	986,7	735,4	736,5	806,5	879,1
<b>Distância termopar-cordão (mm)</b>	3,0	2,0	2,5	2,5	3,0	3,0

Como constatado na Figura 71 e na Tabela 13, o termopar referente a soldagem com alimentação dinâmica de arame com frequência de 3 Hz atingiu a maior temperatura, 986,7 °C, porém foi o ensaio em que o termopar estava mais próximo do cordão, ou seja, da fonte de calor. Nos ensaios com as frequências de 6 Hz e 9 Hz, os termopares apresentaram mesma distância, 2,5 mm da borda do cordão, e resultaram em temperaturas muito semelhantes, 735,4 °C e 736,5 °C respectivamente, não havendo diferença significativa das temperaturas máximas atingidas.

Os ensaios com as frequências de 0 Hz, 12 Hz e 15 Hz apresentaram a mesma distância do termopar para a borda do cordão, 3,0 mm e as curvas são novamente apresentadas na Figura 72. Os resultados obtidos mostram que a temperatura máxima atingida no ponto em que o termopar foi soldado aumentou com o aumento da frequência, atingindo o valor máximo de 879,1 °C para 15 Hz, enquanto a temperatura máxima atingida na soldagem com alimentação contínua foi de 660,7 °C. Os resultados de temperatura obtidos demonstram que o processo de soldagem com alimentação dinâmica de arame é mais quente do que alimentação contínua, reforçando os resultados de potência obtidos.

Figura 72. Curvas de temperatura obtidas através de termopares para os cordões soldados com frequência de alimentação de arame de 0 Hz, 12 Hz e 15 Hz.

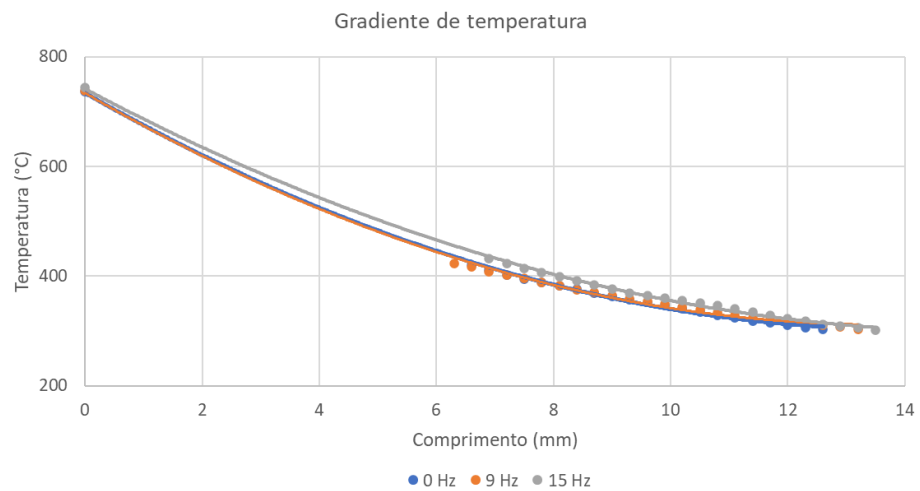


Para analisar os resultados da filmagem térmica, como descrito no capítulo 3.2.5.3, uma linha longitudinal foi traçada a partir da temperatura de 740 °C (ponto A) em direção ao início dos cordões (ponto B) e o gradiente de temperatura ao longo da linha A-B foi analisado. O gradiente de temperatura, neste caso, é a variação da temperatura em um comprimento definido e foi calculado pela razão entre a diferença de temperatura em um mesmo comprimento da linha traçada para as análises, como mostra a fórmula 6. onde G é o gradiente de temperatura,  $\Delta T$  a variação da temperatura e  $\Delta x$  a variação do comprimento.

$$G = \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (6)$$

Para facilitar a visualização e análise dos dados, estão expostos na Figura 73 o gradiente de temperatura dos cordões soldados com frequência de 0 Hz, 9 Hz e 15 Hz. Os dados obtidos para as demais frequências apresentaram comportamento muito parecido com os encontrados nas frequências 0 Hz e 9 Hz e para facilitar a visualização no gráfico não serão expostos.

Figura 73. Gradiente térmico obtido nos cordões soldados com frequência de 0 Hz, 9Hz e 15 Hz.



É possível constatar a partir dos resultados que na soldagem com frequências de 0 Hz e 9 Hz as linhas de tendência se sobrepõem, assumindo comportamento praticamente idêntico, não sendo possível evidenciar diferença no gradiente de temperatura. A soldagem com 15 Hz apresentou menor gradiente térmico, para comprimento de 7 mm por exemplo, a variação da temperatura foi 307,0 °C, resultando em um gradiente térmico de 43,8 °C/mm. Já nos cordões soldados com 0 Hz e 9 Hz, para o mesmo comprimento de 7 mm, os valores de gradiente térmico foram 47,1 °C/mm e 47,4 °C/mm respectivamente. O menor gradiente térmico encontrado na soldagem com 15 Hz sugere que em um mesmo ponto as temperaturas atingidas foram superiores quando comparado com o resultado dos cordões com 0 Hz e 9 Hz.

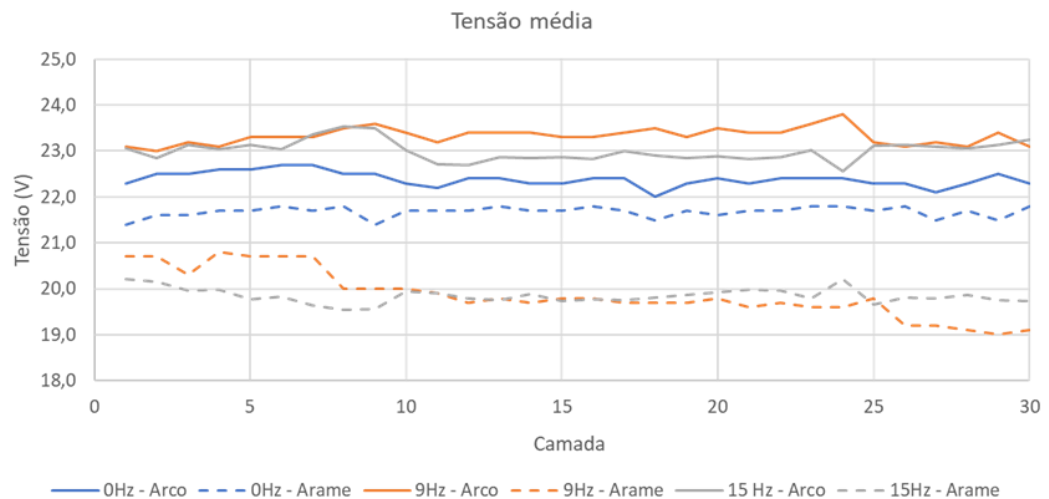
## 4.2 PAREDES

### 4.2.1 Análise dos sinais elétricos e estabilidade do processo

Repetindo a metodologia utilizada na soldagem de cordão único sobre chapa, para analisar o comportamento dos sinais elétricos ao longo das camadas, os dados foram analisados individualmente e os valores médios empregados para análise da parede. A corrente média em todas as camadas para as três paredes soldadas permaneceu bastante estável, variando de 192 a 196 A. Os valores de tensão média do arco e entre o eletrodo e o

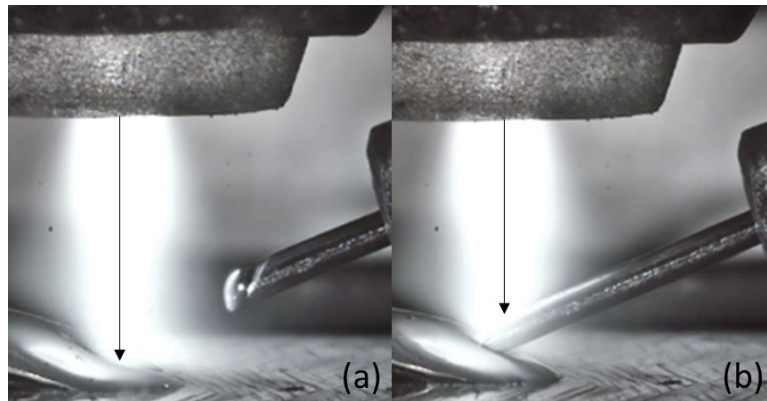
arame foram calculados para todas as camadas e os resultados estão expostos na Figura 74, onde a linha contínua representa a tensão do arco e a pontilhada a tensão referente ao arame.

Figura 74. Tensão média do arco e arame por camada, para as três paredes soldadas com frequência de 0 Hz, 9 Hz e 15 Hz.



A tensão média do arco na alimentação contínua de arame foi cerca de 1 V inferior às tensões médias das paredes com alimentação dinâmica em frequências de 9 Hz e 15 Hz, atingindo valor médio de 22,4 V. Assim como o comportamento observado no depósito de cordão único, a leve queda da tensão para a condição de alimentação contínua de arame em ponte, deve-se ao fato de haver a diminuição do comprimento do arco, pelo menos parcialmente. Com o arame dentro da poça, parte do arco ancora sobre a superfície do arame, e não sobre a superfície da chapa ou cordão anteriormente soldado, resultando em um arco mais curto e de menor tensão. No caso da alimentação contínua de arame em ponte, o arame permanece durante todo o processo dentro da poça, ocasionando o encurtamento do arco e conseqüente queda na tensão. Na alimentação dinâmica, o arame permanece, em média, metade do período de soldagem fora da poça, e nesses momentos o arco é ancorado integralmente na peça base. Esse comportamento resulta no aumento do comprimento e da tensão do arco. A Figura 75 exemplifica o que ocorre para os dois modos de alimentação de arame.

Figura 75. (a) Comportamento do arco nos períodos em que o arame está fora da poça durante a soldagem com alimentação dinâmica de arame. (b) Comportamento do arco nos momentos em que o arame está dentro da poça durante a soldagem com alimentação dinâmica e durante a soldagem com alimentação contínua de arame.



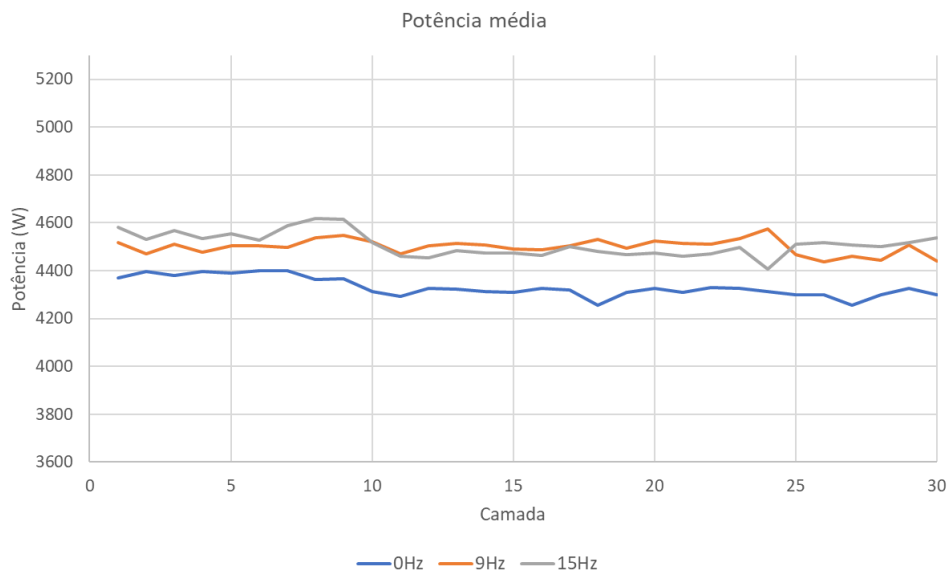
Em relação à tensão do arame, o comportamento segue o observado no depósito sobre chapa, com valores próximos à tensão do arco na alimentação contínua de arame e nos períodos em que o arame está dentro da poça na alimentação dinâmica. Por outro lado, a tensão diminui nos momentos em que o arame deixa a poça e se afasta do arco, aproximando-se do eletrodo. A tensão média do arame na alimentação contínua foi 0,7 V inferior a tensão do arco, atingindo 21,7 V. Para a alimentação dinâmica, como ocorre a alternância entre os períodos de arame dentro e fora da poça, a tensão média é inferior àquela encontrada na alimentação contínua, atingindo 19,9 V e 19,8 V para as frequências de 9 Hz e 15 Hz respectivamente. Os resultados das médias obtidas nas 30 camadas de cada parede estão representados na Tabela 13.

Tabela 13. Média dos sinais elétricos das 30 camadas de cada parede soldada.

<b>Média dos sinais elétricos das paredes</b>			
	<b>0Hz</b>	<b>9Hz</b>	<b>15Hz</b>
<b>Tensão arco (V)</b>	22,4 ± 0,3	23,3 ± 0,3	23,0 ± 0,4
<b>Tensão arame (V)</b>	21,7 ± 0,2	19,9 ± 0,9	19,8 ± 0,3
<b>Diferença tensão (V)</b>	0,71 ± 0,3	3,4 ± 1,0	3,2 ± 0,6
<b>Corrente (A)</b>	193,5 ± 1,3	192,8 ± 1,5	196,0 ± 1,6
<b>Potência (W)</b>	4330,8 ± 68,8	4499,8 ± 53,9	4509,6 ± 75,0

Os resultados da Tabela 14 apresentam os valores de potência média das paredes e evidencia-se que a parede soldada com alimentação dinâmica de 15 Hz de frequência apresentou potência quase 180,0 W maior do que a potência média da parede com alimentação contínua de arame. De forma semelhante a soldagem com 15 Hz, a parede soldada com 9 Hz apresentou valor médio de potência de aproximadamente 4500 W, superior aos 4330,8 encontrados na alimentação contínua. A Figura 76 apresenta os valores de potência média por camada para as três paredes.

Figura 76. Valores de potência média por camada das paredes soldadas com 0 Hz, 9 Hz e 15 Hz.



Os valores de potência média maiores para a alimentação dinâmica em relação à contínua estão diretamente relacionados com a tensão do arco do processo, que foi superior para as paredes soldadas com alimentação dinâmica de arame.

#### 4.2.2 Análise geométrica

A primeira análise realizada após a soldagem das paredes foi a visual e é possível perceber que as três paredes apresentaram perfil e características semelhantes. Nota-se que há diferença de altura entre o início e o final das paredes e esta característica é resultado do aquecimento da parede ao longo da soldagem e a cada nova camada, ocorrendo o aumento da molhabilidade do cordão. Com o aumento da temperatura e da molhabilidade o cordão



apresenta tendência a assumir perfil de menor altura e maior largura, com efeito acumulativo ao longo das camadas. A Figura 77 apresenta imagens das três paredes soldadas.

Figura 77. Imagens das paredes soldadas com frequência de alimentação de 0 Hz, 9 Hz e 15 Hz, apresentando a vista frontal, superior e lateral.



Antes da realização dos cortes descritos na metodologia, as dimensões das paredes foram medidas com o auxílio de um paquímetro e os valores encontrados estão descritos na Tabela 14.

Tabela 14. Dimensões das paredes.

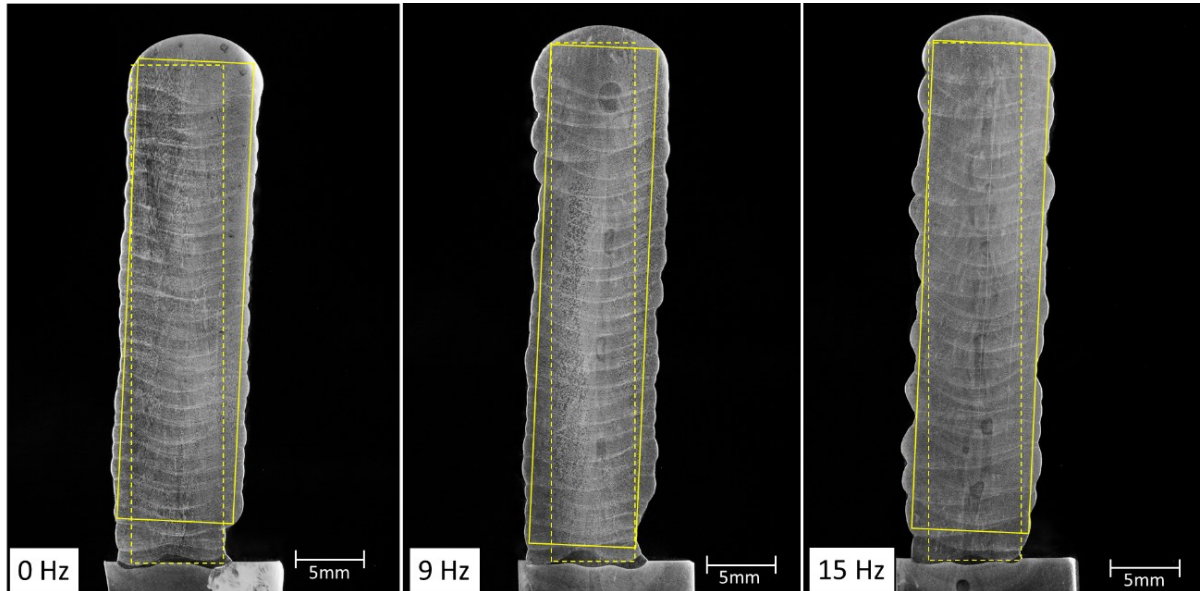
Parede	0 Hz	9 Hz	15Hz
Comprimento (mm)	<b>150,0</b>	<b>152,0</b>	<b>151,0</b>
Altura início (mm)	<b>44,3</b>	<b>45,1</b>	<b>47,4</b>
Altura meio (mm)	<b>41,8</b>	<b>42,7</b>	<b>43,7</b>
Altura fim (mm)	<b>28,5</b>	<b>29,0</b>	<b>29,0</b>
Altura média camada (mm)*	<b>1,39</b>	<b>1,42</b>	<b>1,46</b>
Largura (mm)**	<b>11,0</b>	<b>11,6</b>	<b>11,5</b>

\*Utilizando valores de altura no meio da parede. \*\*Medida realizada no meio da parede

A parede soldada com frequência de alimentação de arame de 15 Hz apresentou 458,4 mm de altura no início, 3,1 mm superior à altura do início da parede soldada com alimentação contínua. Apesar do aumento sutil da altura no acumulado de 30 camadas, os resultados corroboram com os encontrados no depósito de cordão único sobre chapa. Já a parede soldada com 9 Hz foi apenas 0,9 mm mais alta que a parede com alimentação contínua, não apresentando diferença significativa. Além da maior altura, as paredes construídas com alimentação dinâmica apresentaram largura superior quando comparadas com a parede construída com alimentação contínua. Este resultado se opõe ao resultado obtidos no depósito sobre chapa, em que a alimentação dinâmica resultou em cordões de menor largura.

A etapa posterior para análise da geometria das paredes foi a realização dos cortes, como descrito na metodologia. A partir dos cortes transversais é possível verificar que as paredes soldadas com alimentação dinâmica, além de maior largura, apresentaram laterais com maior rugosidade do que a parede soldada com alimentação contínua, como pode ser observados na Figura 78. Uma possível justificativa para essa característica é a agitação da poça no momento da soldagem, que é mais intensa com o aumento da frequência, causando um deslocamento da porção líquida de material. Aliada à intensa movimentação, a potência média atingida na soldagem com alimentação dinâmica é maior do que na alimentação contínua, sugerindo maior temperatura. Esta combinação de fatores pode favorecer a formação de cordões mais largos e o escorrimento lateral do cordão ao longo das camadas durante a soldagem. Esta característica pode comprometer a precisão dimensional das peças na aplicação para manufatura aditiva e/ou exigir retirada maior de material na etapa pós soldagem para atingir a geometria final desejada.

Figura 78. Corte transversal das paredes com a área efetiva destacada. Os retângulos com linha contínua demarcam a maior área efetiva das paredes e os com linha tracejada demarcam a área efetiva sem excluir a base das paredes.



Outro aspecto que pode ser observado a partir da Figura 78 é diferença de largura das primeiras camadas das paredes de 0 Hz e 9 Hz para as camadas superiores. Como em todas as camadas os parâmetros de soldagem utilizados foram os mesmos, é esperado que os primeiros cordões tendam a ser mais convexas e estreitos devido a troca de calor com a chapa base que ainda se encontra a temperatura ambiente. É possível observar que na soldagem com alimentação em 15 Hz este efeito é minimizado, possivelmente pela união da potência média superior e da intensa agitação da poça.

Além das dimensões das paredes, a área efetiva da seção transversal foi mensurada. Foi definida como área efetiva a área do maior retângulo possível de ser extraído dentro da área da parede. As áreas foram calculadas de duas formas, a primeira sem considerar a utilização da chapa base e a segunda considerando a chapa base. Os retângulos estão definidos de forma esquemática na Figura 78, onde o com linha contínua sinaliza a área efetiva sem considerar a chapa base e o retângulo de linha tracejada demarca a área efetiva considerando a chapa base. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 15.

Tabela 15. Área efetiva da seção transversal das paredes.

Parede	0Hz	9Hz	15Hz
Área total (mm <sup>2</sup> )	<b>446,55</b>	<b>450,95</b>	<b>467,79</b>
Área efetiva (mm <sup>2</sup> )	<b>352,77</b>	<b>359,74</b>	<b>378,87</b>
Área efetiva (%)	<b>79,00</b>	<b>79,77</b>	<b>80,99</b>
Área efetiva até a base (mm <sup>2</sup> )	<b>304,32</b>	<b>314,7</b>	<b>327,97</b>
Altura área efetiva até a base (mm)	<b>42,2</b>	<b>44,6</b>	<b>42,9</b>
Largura área efetiva até a base (mm)	<b>7,2</b>	<b>7,0</b>	<b>7,6</b>
Área efetiva até a base (%)	<b>68,15</b>	<b>69,79</b>	<b>70,11</b>

As maiores áreas efetivas foram encontradas sem considerar a chapa base, chegando a 81,0 % da área total da parede na soldagem com 15 Hz. A parede soldada com alimentação contínua de arame apresentou para a mesma situação área efetiva de 79,0 % e a parede de 9 Hz resultou em 79,8 % de área efetiva. No cálculo da área efetiva considerando a base houve uma queda de aproximadamente 13 % nos valores para todas as frequências. De fato, as paredes soldadas com alimentação dinâmica apresentaram altura e largura ligeiramente superiores à parede com alimentação contínua, resultando em maior área total. Vale ressaltar que mesmo com as laterais mais rugosas, a parede de 15 Hz exibiu, mesmo que sutilmente, maior área efetiva.

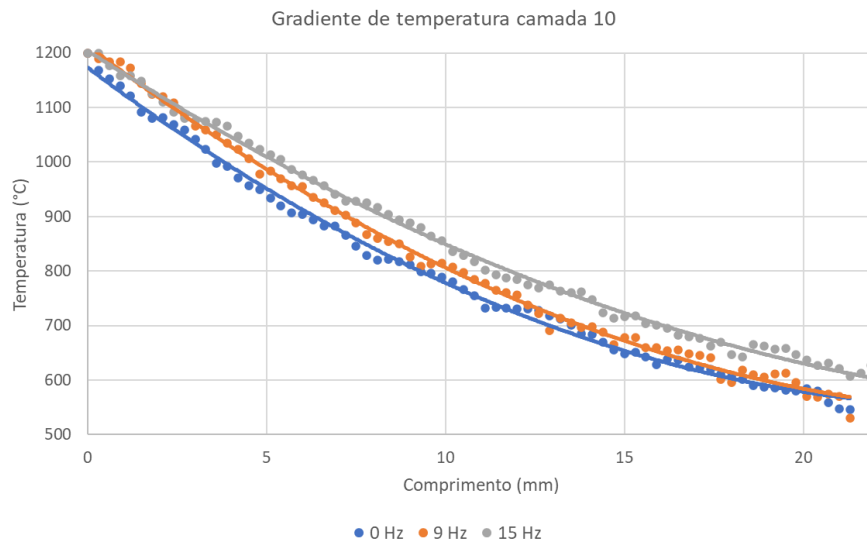
#### 4.2.3 Análise térmica

Seguindo a metodologia proposta, todas as camadas de cada parede foram filmadas com a câmera termográfica e a análise dos resultados realizada no software Altair. Para analisar o gradiente térmico foram utilizadas as camadas 10, 20 e 30 de cada parede. O objetivo foi comparar o perfil de temperatura ao longo da linha A-B traçada (Figura 41 da metodologia) na superfície das camadas a partir do ponto de 1200 °C, para a alimentação contínua de arame e alimentação dinâmica em frequência de 9 Hz e de 15 Hz. A primeira análise foi realizada na camada 10 das paredes e os resultados estão expostos na Figura 79. É possível constatar que a parede soldada com alimentação em 15 Hz apresentou menor gradiente térmico quando comparado com as paredes de 9 Hz e 0 Hz.

A linha de tendência da temperatura traçada no gráfico da Figura 79 evidencia que, por exemplo, para o comprimento de 10 mm da linha traçada a temperatura na parede de 15 Hz foi de aproximadamente 856,0 °C, apresentando gradiente térmico de 34,4 °C/mm. Já na

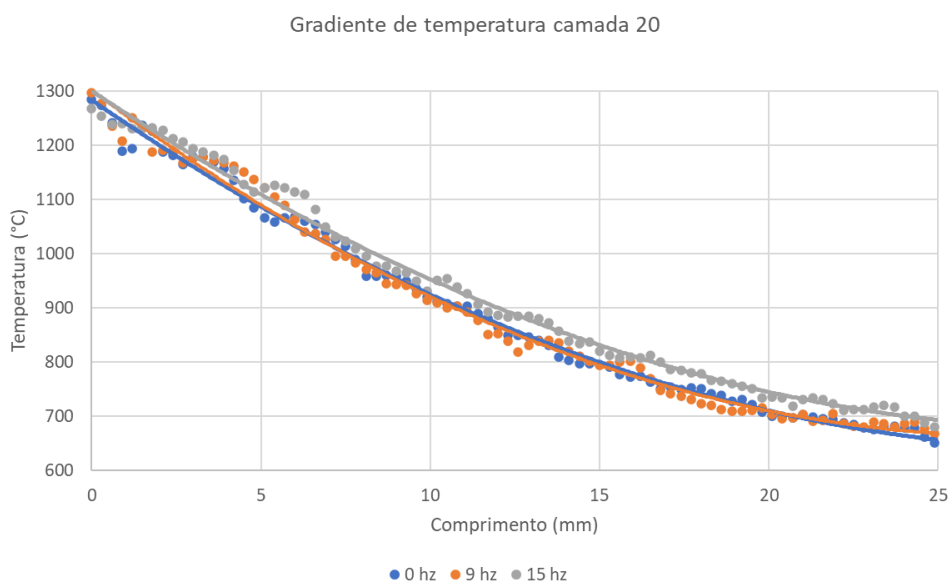
soldagem de 9 Hz a temperatura atingida no mesmo comprimento foi de 815,0 °C, resultando em um gradiente térmico de 38,5 °C/mm. Na parede soldada com alimentação constante o gradiente térmico foi ainda maior, visto que a temperatura no comprimento de 10 mm foi 789,0 °C, atingindo 41,1 °C/mm.

Figura 79. Gradiente térmico obtido na camada 10 das paredes soldadas com frequência de 0 Hz, 9 Hz e 15 Hz.



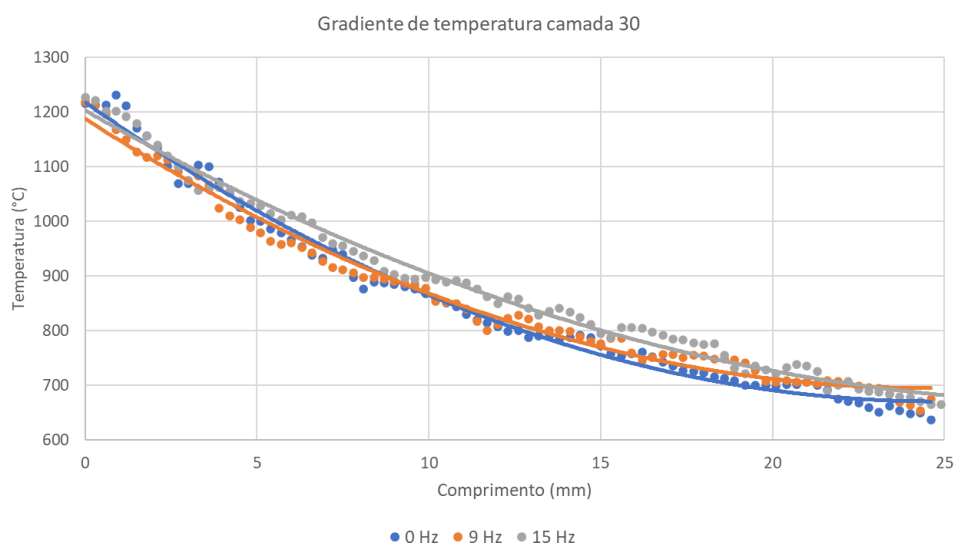
O resultado das análises realizadas nas camadas 20 e 30 mantiveram a mesma tendência, ou seja, a parede soldada com alimentação dinâmica com frequência de 15 Hz apresentou menor gradiente térmico quando comparada com as demais paredes. O menor gradiente térmico é um indicio de maior temperatura em um mesmo ponto, ou seja, A parede soldada com alimentação de 15 Hz apresentou temperaturas superiores àquelas apresentadas nas paredes soldadas com alimentação contínua e dinâmica com 9 Hz. A maior temperatura obtida na parede soldada com 15 Hz corrobora com os resultados obtidos no depósito de cordão único sobre chapa. A Figura 80 apresenta o perfil de temperatura das paredes na vigésima camada.

Figura 80. Gradiente térmico obtido na camada 20 das paredes soldadas com frequência de 0 Hz, 9 Hz e 15 Hz.



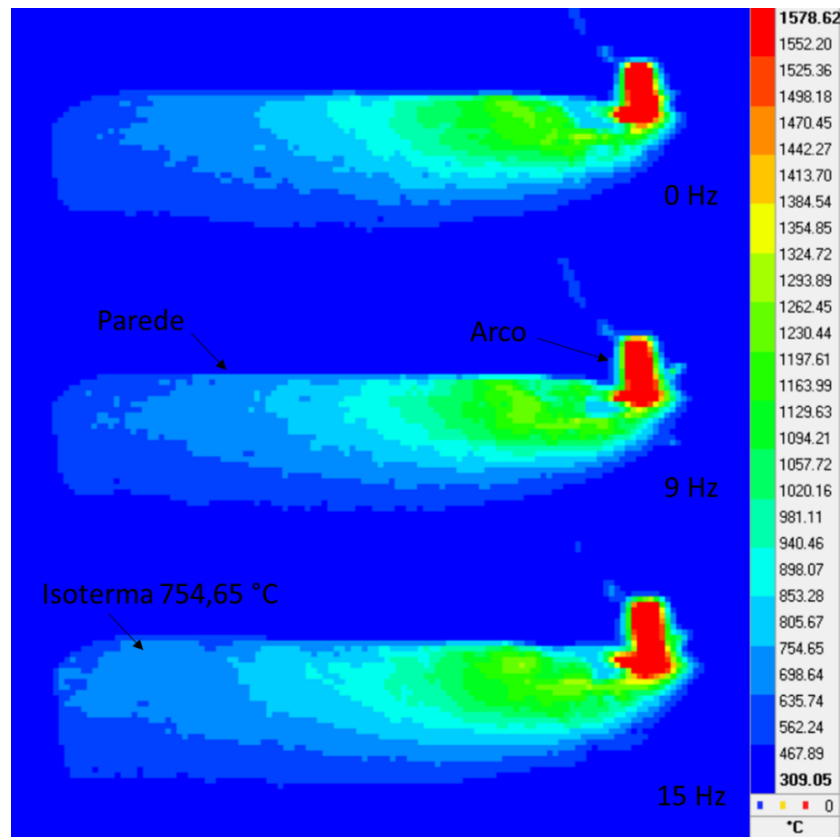
Os resultados do perfil de temperatura obtidos para a parede soldada com alimentação contínua e alimentação dinâmica de 9 Hz apresentaram valores muito próximos, principalmente nas camadas 20 e 30, não havendo diferença significativa. A Figura 81 expõe os resultados obtidos na trigésima camada das paredes.

Figura 81. Gradiente térmico obtido na camada 30 das paredes soldadas com frequência de 0 Hz, 9 Hz e 15 Hz.



Para ilustrar os resultados obtidos, foram retiradas imagens do software de análise da câmera do trigésimo cordão de cada parede evidenciando em cores as isothermas e diferenças de temperatura nas diferentes regiões das paredes. As imagens são exibidas na Figura 82.

Figura 82. Imagens da camada 30 de cada parede obtidas pela câmera térmica evidenciando as isothermas das paredes.



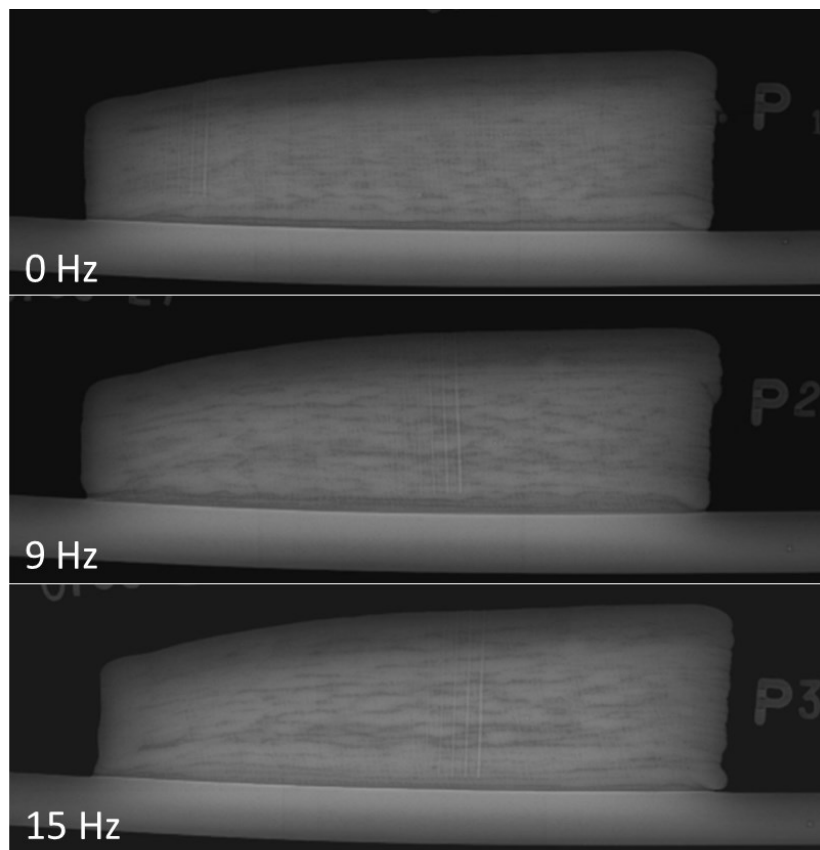
É possível perceber a partir das imagens que as isothermas, especialmente a de 754,65 °C, cobrem uma área maior da parede. Na parede soldada com alimentação dinâmica com frequência de 15 Hz a isoterma de 754,65 °C atinge maior distância do arco, chegando ao início da parede, enquanto na soldagem com alimentação contínua de arame e de 9 Hz essa isoterma é menor. Os resultados obtidos nas condições estudadas se opõem aos descritos por Silva et al. (2018) em que a soldagem TIG com alimentação dinâmica apresentou menor temperatura quando compara com alimentação contínua de arame. Vale ressaltar que os estudos de Silva et al. (2018) avaliaram baixas frequências, de 1 Hz e 2 Hz.

Pensando na aplicação para manufatura aditiva, temperaturas mais altas no processo podem acarretar maior tempo de espera entre camadas e escorrimento das camadas, podendo comprometer a precisão dimensional da peça.

#### 4.2.4 Análise da microestrutura

Antes da operação de corte nas paredes para análise da microestrutura foram realizados ensaios de Raio-x, a fim de detectar possíveis defeitos internos como porosidade ou falta de fusão. Após análise do resultado dos Raio-X, nenhum defeito foi encontrado em nenhuma das três paredes soldadas. Os resultados dos Raio-X estão expostos na Figura 83.

Figura 83. Resultado do ensaio de Raio – X realizado nas paredes.



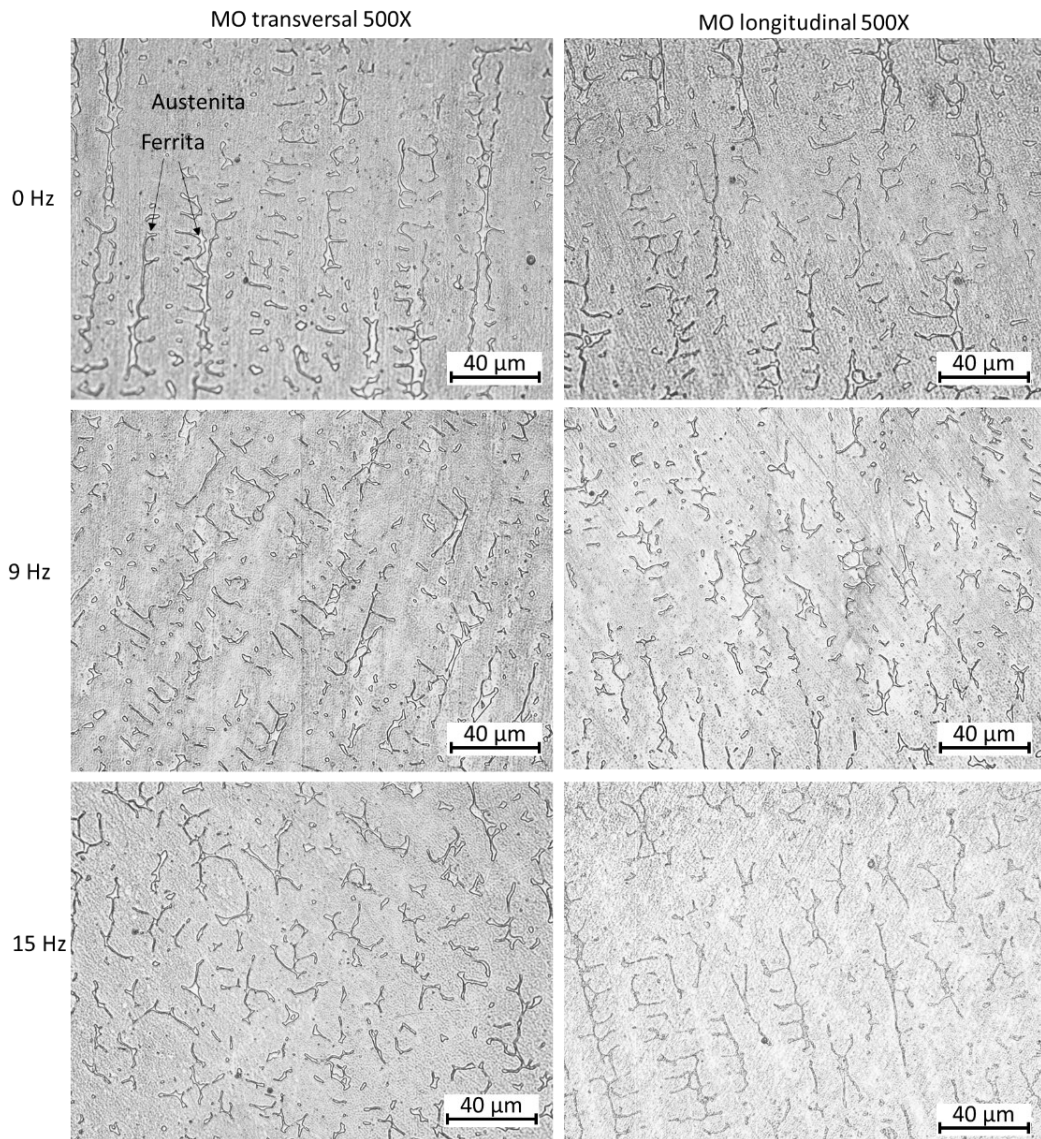
No Raio-X das paredes soldadas com 9 Hz e 15 Hz são percebidas em maior quantidade linhas longitudinais escuras. Estas linhas correspondem a rugosidade da lateral das parede, que são mais profundas e em maior quantidade na alimentação dinâmica, como foi observado na análise geométrica das paredes. Para a análise da microestrutura, foram



avaliadas as faces de corte transversal e longitudinal das paredes. Como na manufatura aditiva as peças construídas muitas vezes são usinadas para atingirem sua forma final, as primeiras e última camadas acabam sendo descartadas nesse processo. Por esse motivo, a análise da microestrutura foi realizada no centro da parede.

Devido à sua composição química, o aço inoxidável 309 L inicia sua solidificação como ferrita delta a partir do líquido. Após a solidificação, a ferrita torna-se menos favorecida termodinamicamente e a austenita começa a se formar e crescer, ocorrendo a transformação em estado sólido. Posteriormente à transformação de fase, a ferrita restante é encontrada em estruturas dendríticas conhecidas como dendrita vermicular ou dendrita em formato de “esqueleto”. A Figura 84 apresenta imagens do centro das paredes realizadas no Microscópio óptico com ampliação de 500x. As estruturas mais escuras são a fase ferrítica do aço e se assemelham com dendritas “esqueleto”.

Figura 84. Figura Imagens da microestrutura do centro das paredes realizadas no sentido transversal e longitudinal com ampliação de 500X.

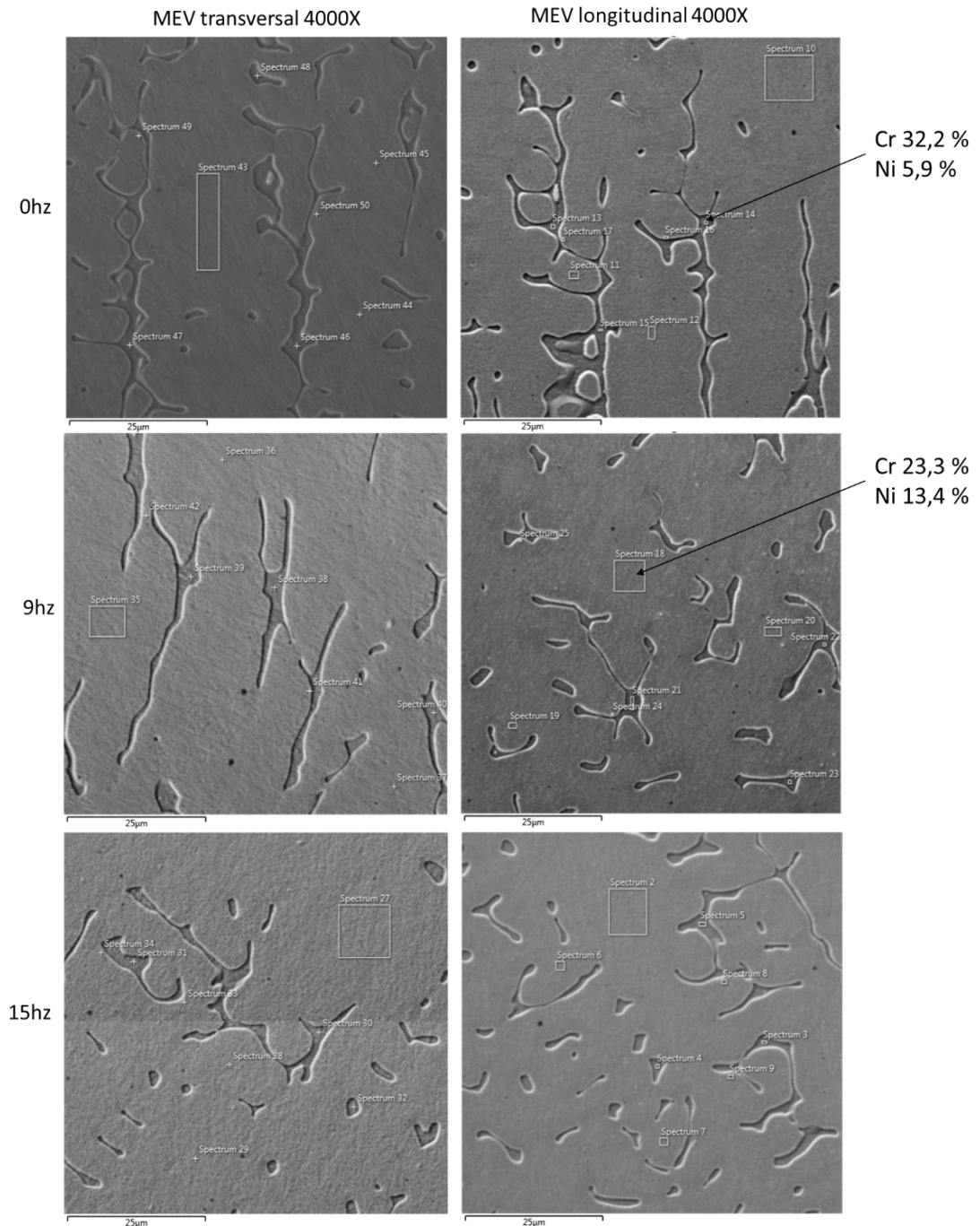


É possível perceber a partir da Figura 84 que a soldagem com alimentação contínua de arame apresentou microestrutura muito parecida nos dois sentidos avaliados, com fase ferrítica em formato de dendritas definidas e longas. Com a introdução da alimentação dinâmica, a fase ferrítica ficou mais dispersa e com dendritas mais curtas, principalmente na parede soldada com alimentação dinâmica em frequência de 15 Hz. Uma possível explicação para esse resultado é a elevada agitação da poça causada pelo movimento do arame, alterando a direção de máximo fluxo de calor, que deixa de ser perpendicular ao contorno da poça fundida e altera-se continuamente, reduzindo a formação de grandes estruturas de grãos colunares, resultando em grãos menores. Em seu trabalho com alimentação dinâmica de aço

inoxidável 308 L, Foley [11] relatou os resultados da microestrutura obtidos como grãos refinados e de morfologia e orientação de crescimento altamente variados.

As amostras de paredes preparadas metalograficamente foram levadas ao MEV para realização da análise química das fases via EDS e para capturar imagens com maior ampliação. A Figura 85 apresenta o resultado das imagens obtidas com ampliação de 4000X e as áreas utilizadas para realização da análise química.

Figura 85. Imagens da microestrutura do centro das paredes realizadas no sentido transversal e longitudinal com ampliação de 4000X, com destaque para as áreas analisadas via EDS.



A imagens resultantes do MEV mostram novamente que, para a alimentação dinâmica, a fase ferrítica possui grãos menores, mais dispersos e com orientação e morfologia variadas. Na parede com alimentação contínua de arame as dendritas são mais grosseiras e mais consistentes em sua orientação. Características semelhantes foram obtidas por Riffel et al. (2020) na soldagem TIG de Inconel 625 com alimentação dinâmica. Riffel et al. (2020)

apresentam resultados de maior espalhamento de precipitados e refino de grão da microestrutura na soldagem com alimentação em frequência de 18 Hz quando comparado com alimentação contínua de arame.

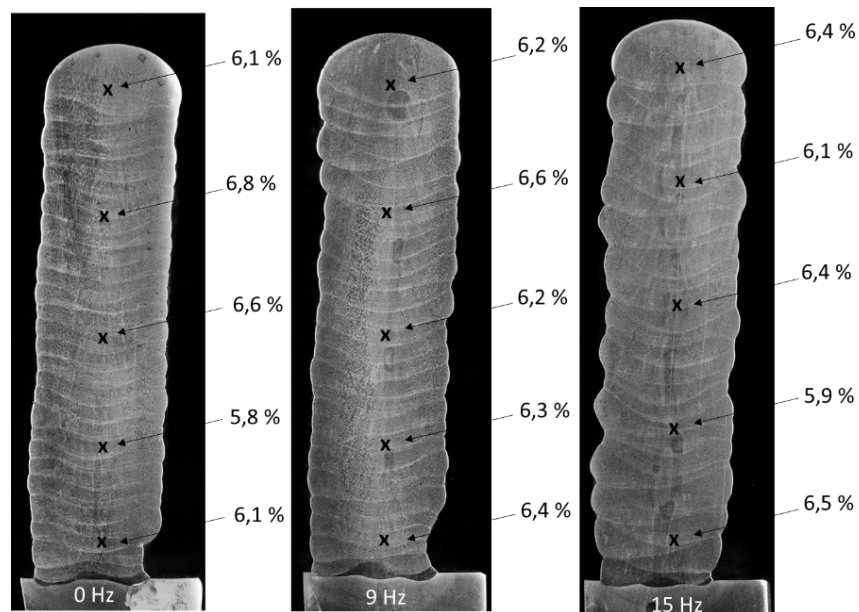
O resultado da análise química das fases mostrou, como o esperado, que a ferrita é rica em cromo, elemento formador de ferrita, e a fase austenítica é rica em níquel, elemento estabilizador desta estrutura, também conhecido como elemento austenitizante. Os resultados de duas análises estão expostos na Tabela 16, onde o spectrum 14 é referente a análise química de um ponto dentro da ferrita e o spectrum 18 uma área na fase austenítica. Os pontos estão indicados na Figura 85.

Tabela 16. Resultado da análise química das fases realizado via EDS

Elemento %	Cr	Ni	Si	Mn	Mo	Fe
Spectrum 14	<b>32,27</b>	<b>5,91</b>	<b>1,05</b>	<b>1,44</b>	<b>0,10</b>	<b>59,33</b>
Spectrum 18	<b>23,29</b>	<b>13,40</b>	<b>0,93</b>	<b>2,17</b>	<b>0</b>	<b>60,21</b>

A quantidade de fase ferrítica formada na microestrutura ao longo da parede foi mensurada com o auxílio de um ferritoscópio. Foram realizadas 5 medições no comprimento da parede e os resultados estão expostos na Figura 86.

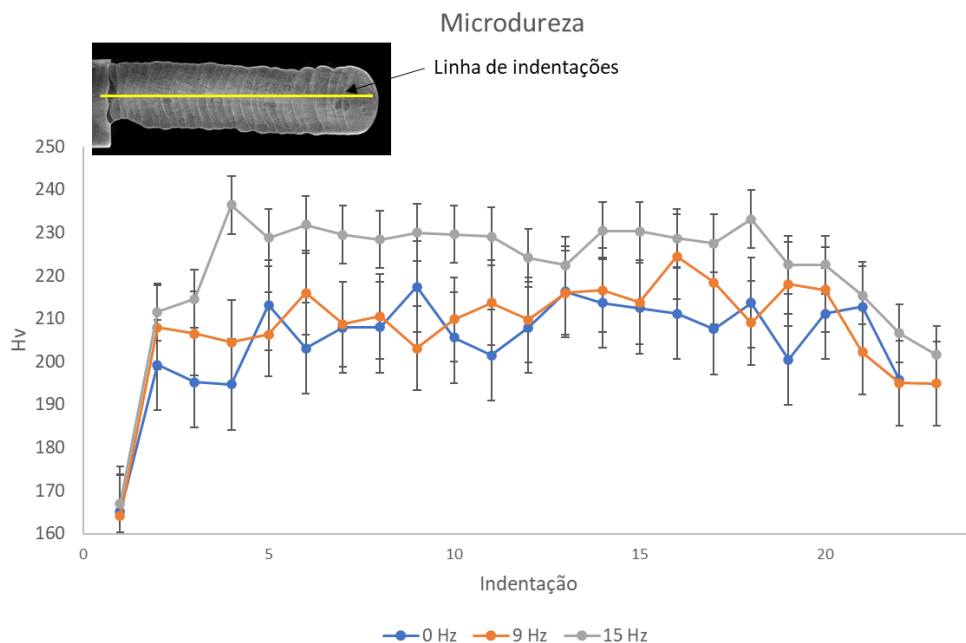
Figura 86. Perfil de fase ferrítica ao longo das paredes.



É possível perceber que a frequência de alimentação de arame não tem influência direta na quantidade de fase ferrita presente na microestrutura das paredes. Para todas as amostras, a média de fase ferrítica presente na microestrutura foi de 6,3 %, não havendo também variação significativa dos valores a longo de uma mesma parede. De maneira geral, por mais que a distribuição e morfologia da fase ferrítica tenham variado ligeiramente entre as paredes, não houve alteração na quantidade desta fase para todos os casos.

Após a análise da microestrutura o ensaio de microdureza vickers foi realizado nas paredes e os resultados são apresentados no gráfico da Figura 87.

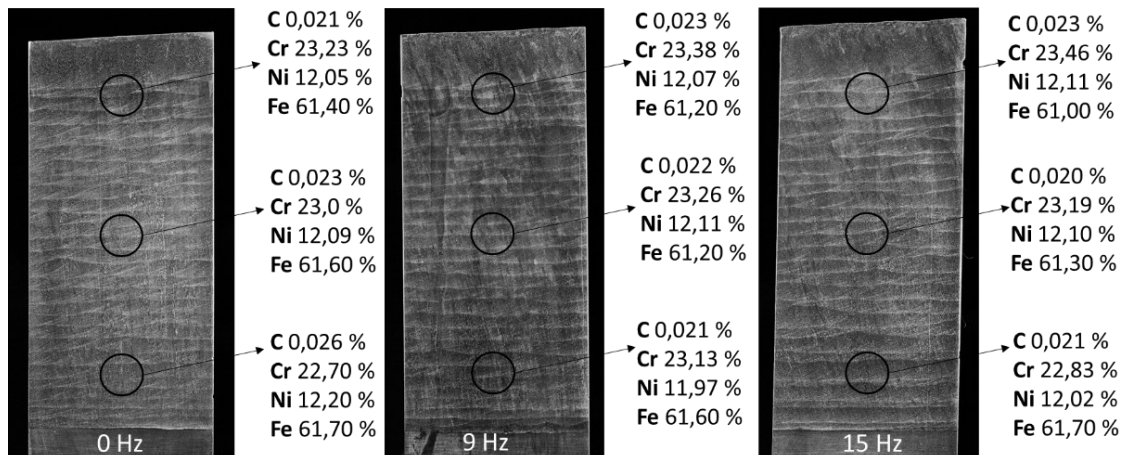
Figura 87. Resultado ensaio de microdureza realizado nas paredes.



A parede soldada com alimentação dinâmica com frequência de 15 Hz apresentou valores de dureza ligeiramente superiores aos resultados obtidos com alimentação contínua e dinâmica com frequência de 9 Hz, como pode ser observado na Figura 87. Excluindo o valor de dureza da base, que para todas as paredes teve média de aproximadamente 165 HV, a parede soldada com 15 Hz apresentou dureza média de 224 HV enquanto os valores de dureza média para a parede de 0 Hz e 9 Hz foram 207 HV e 210 HV respectivamente. Este aumento da dureza pode estar relacionado com os resultados obtidos na análise da microestrutura, com maior dispersão da fase ferrítica, mais dura e rica em cromo, na matriz austenítica. A maior dispersão de ferrita e o refino de grão podem ter aumentado a interface ferrita-austenita e a área de contorno de grãos austeníticos, o que dificulta o movimento de discordâncias.

Com o objetivo de avaliar a homogeneidade da composição química ao longo da parede de forma macroscópica, um perfil de composição química foi traçado e analisado utilizando espectrometria de emissão óptica. Foram realizadas análises em três pontos de cada parede, próximo à base da chapa, no centro e uma análise próxima ao topo da paredes, como pode ser observado na Figura 88.

Figura 88. Resultado da análise química realizada nas paredes via espectrometria de emissão óptica.



É possível constatar a partir dos resultados que a composição química se mantém constante ao longo da parede, com variações não significativas na composição. Um detalhe interessante é que o teor de ferro diminui ligeiramente da base para o topo da camada, comportamento esperado visto que o ponto de medição da base está mais próximo da chapa, rica em ferro. Nas primeiras camadas a diluição do material de adição com o material da base é maior, tornando as primeiras camadas mais ricas em ferro do que a composição apenas do arame. À medida que as camadas são adicionadas a diluição entre o arame e base diminui, resultando na composição química apenas do arame. De maneira geral, foi possível observar que para todas as paredes a composição química se mostrou homogênea.

## 5 CONCLUSÕES

### 5.1 CONCLUSÕES GERAIS

O presente trabalho representa uma importante contribuição para a caracterização da soldagem plasma com alimentação dinâmica de arame, principalmente aplicada à manufatura aditiva, pois estudos acerca deste tema ainda são bastante escassos na literatura. Foram abordados os fenômenos que ocorrem na aplicação da alimentação dinâmica em diferentes frequências e sua influência nas características geométricas, térmicas e microestruturais dos cordões. Numa avaliação acerca dos resultados obtidos é possível concluir:

- O movimento de oscilação do arame influencia na tensão média do arco, sendo esta superior na alimentação dinâmica quando comparada com alimentação contínua em ponte.

- Os maiores valores de potência média na alimentação dinâmica podem ser os responsáveis pelo aumento da temperatura dos cordões, especialmente para frequência de 15 Hz.

- Mesmo com a potência média e temperatura mais elevada, a alimentação dinâmica em altas frequências, como 15 Hz, resultaram em cordões e conseqüentemente paredes mais altas do que aqueles obtidos com alimentação contínua de arame.

- A maior altura dos cordões e paredes resultantes das altas frequências de alimentação dinâmica é justificada pelo movimento da poça ocasionado pela oscilação do arame.

- Maiores frequências de alimentação dinâmica fomentam maior simetria da seção transversal do cordão

- A microestrutura da parede soldada com alimentação dinâmica de 15 Hz apresentou fase ferrítica mais dispersa e com dendritas menores quando comparada com aquela obtida com alimentação contínua de arame.

- A parede soldada com alimentação dinâmica de 15 Hz apresentou dureza 7,5 % superior à parede soldada com alimentação contínua de arame.

- A composição química se manteve constante ao longo das paredes tanto para alimentação contínua, quanto para alimentação dinâmica.



- Os oscilogramas de tensão entre o eletrodo e a peça e o eletrodo e o arame podem ser usados como um indicativo de estabilidade em processos TIG e Plasma com alimentação de arame.

- O processo plasma com alimentação dinâmica é adequado para aplicação na manufatura aditiva, resultando em paredes íntegras e sem defeitos. Porém, algumas limitações do arranjo de bancada utilizado impedem a construção de geometrias mais complexas. Para isso, seria necessário garantir a mesma orientação de deposição de arame em diferentes posições da tocha, pois a alimentação no processo plasma não é coaxial e a orientação de deposição influencia na geometria dos cordões.

## 5.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Os resultados apresentados neste trabalho atingiram importantes conclusões acerca da caracterização da alimentação dinâmica na soldagem plasma com aplicação na manufatura aditiva. Porém, alguns tópicos abordados na pesquisa admitem a ampliação do estudo, especialmente o modo de alimentação dinâmica de arame. Deste modo, são apresentadas aqui algumas diretrizes e sugestões para trabalhos futuros:

- Aprofundar os estudos térmicos e físicos sobre a poça de fusão e o arco elétrico, objetivando quantificar a troca de calor por convecção e caracterizar o comportamento da tensão arame-eletrodo para diferentes frequências de oscilação do arame;

- Estudar a aplicação de índices estatísticos para avaliação da estabilidade dos processos de soldagem com alimentação dinâmica de arame;

- Estudar e validar uma metodologia mais eficaz para medição de temperatura do processo de soldagem plasma com alimentação de arame;

- Avaliar a aplicação de alimentação dinâmica com arame quente e comparar com alimentação contínua;

- Desenvolver parametrização da alimentação dinâmica para baixas correntes (micro plasma) e avaliar a influência da frequência de oscilação na microestrutura dos cordões.

## REFERÊNCIAS

1. Gnirss, G., *Shape welding. The current state of the art in the Federal Repluc of Germany*. Welding in the World, 1987. **Vol. 25**: p. p. 132-138.
2. Marcelo M. Moraes, P.K., Jorge A. V. Echeverria, *A fabricação, por soldagem, de boacais para componentes nucleares*, in *XII Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem*. 1986: Campos do Jordão, SP.
3. Suyog Jhavar, N.K.J., C.P. Paul, *Development of micro-plasma transferred arc (-PTA) wire deposition process for additive layer manufacturing applications*. Journal of Materials Processing Technology 2014. **214 (2014) 1102–1110**.
4. Yuehai Feng, B.Z., Jie He, Kehong Wang, *The double-wire feed and plasma arc additive manufacturing process for deposition in Cr-Ni stainless steel* Journal of Materials Processing Tech. , 2018. **259 (2018) 206–215**
5. Huft, N.J., *Investigation of multiple torc paw-based additive manufacturing*, in *Metallurgical Engineering*. 2019, Montana Technological University: Butte, MT.
6. IvánTabernero, A.P., Pedro Álvarez, Alfredo Suárez, *Study on arc welding processes for high deposition rate additive manufacturing*, in *19th CIRP Conference on Electro Physical and Chemical Machining*. 2018: Bilbao, Spain.
7. Jianjun Lin, Y.L., Yuxin Liu, Zhe Sun, Kaibo Wang, Zhuguo Li, Yixiong Wu, Binshi Xu, *Microstructural evolution and mechanical property of Ti-6Al-4V wall deposited by continuous plasma arc additive manufacturing without post heat treatment*. Journal of the mechanical behavior of biomedical materials 2017. **69 (2017) 19–29**.
8. PIGOZZO, I.O.E.S., R.H.G.; GALEAZZI, D. et al. , *Pulsed dynamic wire feeding with low insertion angle in GTAW process: a metal transfer characterization*. Weld World, 2022.
9. R. H. G. Silva, R.G.N.S., M. B. Schwedersky, G. Dalpiaz, J. C. Dutra, *Contributions of the high frequency dynamic wire feeding in the gtaw process for increased robustness*. Soldagem & Inspeção., 2019. **2019;24:e2430**.
10. K. C. Riffel, R.H.G.S., W. Haupt, L. E. Silva, G. Dalpiaz, *Effect of dynamic wire in the GTAW process: Microstructure and corrosion resistance*. Journal of Materials Processing Technology, 2020. **285 (2020) 116758**.
11. Foley, R.P., *Microstuctural analysis of additively manufactured 308l stainless steel produced by plasma arc welding*. 2019, Montana Technological University: Montana, USA. p. 143.
12. Wu, C.S., et al., *Plasma arc welding: Process, sensing, control and modeling*. Journal of Manufacturing Processes, 2014. **16(1)**: p. 74-85.
13. Paes, L.E.d.S., *Soldagem tig orbital – técnica de alimentação dinâmica do arame visando aumento na produtividade*, in *Departamento de Engenharia Mecânica*. 2016, Universidade Federal de Santa Catarina: Florianópolis, Brasil. p. 206.
14. Rudy, J.F., *Development and Application of Dabber Gas Tungsten Arc Welding for Repair of Aircraft Engine, Seal Teeth* in *Proceedings of the ASME International Gas Turbine Conference and Exhibit*. 1982: London.
15. Régis Henrique Gonçalves e Silva, L.E.d.S.P., Marcelo Pompermaier Okuyama, and A.B.V. Gustavo Luis de Sousa, Luciano Machado Cirino, Mateus Barancelli Schwedersky, *TIG welding process with dynamic feeding: a characterization approach*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 2018. **96:4467–4475**.

16. V. L. Jorge, C.H.A.S., F. M. Scotti, T. R. Larquer, C. P. Mota, R. P. Reis, A. Scotti, *Desenvolvimento e Avaliação de Técnicas para Pulsção da Alimentação de Arame em Soldagem a Arco*. Soldagem & Inspeção, 2018. **2018;23(3):326-339**.
17. M. Santangelo, B.S., A. Purdy, *Vibration assisted robotic hot-wire gas tungsten arc welding (gtaw) for additive manufacturing of large metallic parts*, in *Solid Freeform Fabrication Symposium – An Additive Manufacturing Conference*. 2016.
18. HALLIDAY, D.R., R.; WALKER, J., *Fundamentals of Physics*, ed. e.H. Wiley. Vol. v. 1. 2008. 1288.
19. PIGOZZO, I.O., *Soldagem TIG Orbital: Otimização de Equipamentos e Prospecções Tecnológicas para Procedimentos de Passe de Raiz*, in *Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica*. 2015, Universidade Federal de Santa Catarina. p. 132.
20. B. Silwal, M.S., *Effect of vibration and hot-wire Gas Tungsten Arc (GTA) on the geometric shape*. 2018. **2018;251:138-145**.
21. 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* in *Departamento de Engenharia Mecânica*. 2018, Universidade Federal de Santa Catarina.
22. R. H. G. Silva, L.E.S.P., C. Marques, K. C. Riffel, M. B. Schwedersky, *Performing higher speeds with dynamic feeding gas tungsten arc welding (GTAW) for pipeline applications*. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2019. **(2019) 41:38**.
23. V. L. Jorge, F.M.S., R. P. Reis, A. Scotti, *The effect of pulsed cold-wire feeding on the performance of spray GMAW*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020. **(2020) 107:3485–3498**.
24. N. Neves , M.F.F., C. F. A. Von Dollinger, J. M. K. Assis, H. J. C. Voorwald, *Effects of gtaw dynamic wire feeding frequencies on fatigue strength of astm a516-70 steel welded joints*. Journal of Materials Engineering and Performance, 2022. **1059-9495**.
25. EWM, *EWM tigSpeed TIG cold/hot wire welding*, EWM, Editor. p. 36.
26. TIPTIG, *The welding revolution*.
27. SYSTEMS, L.A.W., *Dabber® Pro • High precision welding system* [https://www.liburdi.com/docs/welding-services/liburdi-automation/Dabber\\_Pro.pdf](https://www.liburdi.com/docs/welding-services/liburdi-automation/Dabber_Pro.pdf).
28. S. Ríos, P.A.C., S. W. Williams, *Metal transfer modes in plasma wire + arc additive manufacture*. Journal of Materials Processing Technology, 2019. **264 (2019) 45–54**.
29. H. Taguchi, M.H., S. Imanaga, I. Sejima *Characteristics of plasma arc welding with arc wire addition*. Japan Wld. Soc. , 1979. **48, 1065-1069**.
30. H. Wang, S.H., Z. Wang, Q. Xu, *Arc characteristics and metal transfer modes in arcing-wire gas tungsten arc welding*. Int J Adv Manuf Technol 2016. **(2016) 86:925–933**.
31. S. Imanaga, M.H., N. Shibata, M. Kobayashi, E. Hino, *Development of torch position control and welding condition control technology for all-position, multi-layer GTA welding. Development of fully automatic GTA welding system for pipes*. Welding International, 2000. **14, 356–364**.
32. Yudodibroto, B.Y.B., Hermans, M.J.M., Hirata, Y., den Ouden, G., *Influence of filler wire addition on weld pool oscillation during gas tungsten arc welding*. Sci. Technol. Weld. Join, 2004. **9, 163–168**.
33. Jae Ho Jun, J.H.P., Muralimohan Cheepu and Sang Myung Cho, *Observation and analysis of metal transfer phenomena for high-current super-TIG welding process*. Science and technology of welding and joining, 2020. **VOL. 25, NO. 2, 106–111**.

34. Rosa, A.F.d., *Estudo do processo tig com estratégias inovadoras de inserção de arame para aplicação em soldagem orbital*, in *Departamento de Engenharia Mecânica*. 2019, Universidade Federal de Santa Catarina: Florianópolis.
35. RIBEIRO, J.C.B., *Análise de técnicas para soldagem TIG automatizada*, in *Depto. Eng. Mecânica*. 2012, Universidade Federal de Santa Catarina: Florianópolis.
36. Willians, S.W., et al., *Wire + Arc Additive Manufacturing*. Material Science and Technology, 2016. **32**(7): p. 641-647.
37. Donghong Ding, Z.P., Dominic Cuiuri, Huijun Li, *Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests*. Int J Adv Manuf Technol, 2015. **81**:465–481.
38. Giuseppe Venturini, F.M., Francesco Bandini, Antonio Scippa, Gianni Campatelli, *Feature based three axes computer aided manufacturing software for wire arc additive manufacturing dedicated to thin walled components*. Additive Manufacturing 2018. **643–657**.
39. Xingwang Bai, P.C., Jialuo Ding, Xiangman Zhou, Chenglei Diao, Phillippe Bridgeman, Jan roman Hönnige, Haiou Zhang, Stewart Williams, *Numerical analysis of heat transfer and fluid flow in multilayer deposition of paw-based wire and arcadditive manufacturing*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018. **124**.
40. Jianjun Lin, D.G., Yaohui Lv, Yuxin Liu, Xiaoyu Wu, Bin Xu, Gang Xu, Binshi Xu, *Heterogeneous microstructure evolution in Ti-6Al-4V alloy thin-wall components deposited by plasma arc additive manufacturing*. Materials and Design, 2018. **157 (2018) 200–210**
41. F. Martinaa, J.M., S.W. Williams, P. Colegrove, F. Wang, *Investigation of the benefits of plasma deposition for the additive layer manufacture of Ti-6Al-4V*. Journal of Materials Processing Technology 2012. **212 (2012) 1377–1386**.
42. Xu, F.-J., Lü, Y.-H., Xu, B.-S., Liu, Y.-X., Shu, F.-Y., He, P., *Study on process of rapid prototyping based on pulsed plasma arc welding*. Material Science and Technology, 2012. **20 (3), pp. 89-93**
43. W. C. Ke, J.P.O., B. Q. Cong, S. S. Ao, Z. W. Qi, B. Penga, Z. Zeng, *Multi-layer deposition mechanism in ultra high-frequency pulsed wire arc additive manufacturing (WAAM) of NiTi shape memory alloys*. Additive Manufacturing 2022. **50 (2022) 102513**.
44. Jianjun Lin, Y.L., Dengji Guo, Xiaoyu Wu, Zhou Li, Cai Liu, Bingang Guo, Gang Xu, Binshi Xu, *Enhanced strength and ductility in thin Ti-6Al-4V alloy components by alternating the thermal cycle strategy during plasma arc additive manufacturing*. Materials Science & Engineering 2019. **A 759 (2019) 288–297**.
45. Kaibo Wang, Y.L., Zhe Sun, Jianjun Lin, Yaohui Lv, Binshi Xu, *Microstructural evolution and mechanical properties of Inconel 718 superalloy thin wall fabricated by pulsed plasma arc additive manufacturing*. Journal of Alloys and Compounds, 2020. **819 (2020) 152936**.
46. Fernando Veiga, A.S., Teresa Artaza, Eider Aldalur, *Efect of the heat input on wire-arc additive manufacturing of invar 36 alloy: Microstructure and mechanical properties*. Welding in the World 2022. **(2022) 66:1081–1091**.
47. Kou, S., *Welding Metallurgy*. Vol. vol. 2. 2003.
48. Vilarinho, L.O., *As Dimensões do Arco Elétrico*. Soldagem & Inspeção, 2009. **Vol. 14** p. p.271-275.

