



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

Daniel Galeazzi

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA INTEGRADO DE MANUFATURA  
ADITIVA POR DEPOSIÇÃO A ARCO USANDO A VARIANTE GMAW COM  
ALIMENTAÇÃO DINÂMICA CMT**

Florianópolis

2024



Daniel Galeazzi

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA INTEGRADO DE MANUFATURA  
ADITIVA POR DEPOSIÇÃO A ARCO USANDO A VARIANTE GMAW COM  
ALIMENTAÇÃO DINÂMICA CMT**

Tese de doutorado submetida ao Programa de pós-graduação em engenharia mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de doutor em engenharia mecânica  
Orientador: Prof. Dr. Mateus Barancelli Schwedersky.  
Coorientador: Prof. Dr. Régis Henrique Gonçalves e Silva

Florianópolis

2024

Ficha catalográfica gerada por meio de sistema automatizado gerenciado pela BU/UFSC.  
Dados inseridos pelo próprio autor.

Galeazzi, Daniel

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA INTEGRADO DE MANUFATURA ADITIVA POR DEPOSIÇÃO A ARCO USANDO A VARIANTE GMAW COM ALIMENTAÇÃO DINÂMICA CMT / Daniel Galeazzi ; orientador, Mateus Barancelli Schwedersky, coorientador, Régis Henrique Gonçalves e Silva , 2024.

278 p.

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

Inclui referências.

1. Engenharia Mecânica. 2. Manufatura Aditiva. 3. Soldagem. 4. Automação. 5. CMT. I. Barancelli Schwedersky, Mateus. II. Henrique Gonçalves e Silva , Régis. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título.

Daniel Galeazzi

**Desenvolvimento de um Sistema Integrado de Manufatura Aditiva Por  
Deposição a Arco Usando a Variante GMAW Com Alimentação Dinâmica CMT**

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

Prof. Louriel Oliveira Vilarinho, Dr. Eng.  
Universidade Federal de Uberlândia – UFU

Prof. Paulo Cesar Okimoto, Dr. Eng.  
Universidade Federal do Paraná – UFPR

Prof. Tiago Loureiro Figaro da Costa Pinto, Dr. Eng.  
Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC

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

---

Prof. Mateus Barancelli Schwedersky, Dr. Eng.  
Orientador

---

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

---

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

Florianópolis, 2024.

Dedico este trabalho à minha família, em especial à  
minha mãe Marli, meu pai Gilson, meu irmão Eduardo e  
minha vó Lídia.

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus queridos pais, Marli Amaral Galeazzi e Gilson Daniel Galeazzi, agradeço pela educação e ensinamentos que moldaram a pessoa e o cidadão que sou hoje, além do apoio incondicional em todos os momentos da minha jornada e pelo incentivo que me levou à conclusão deste trabalho. Da mesma forma, expresso minha gratidão ao meu irmão, Eduardo Galeazzi, pela convivência e por todas as superações desde a infância e à minha cunhada Mayara Siqueira Galeazzi pela convivência e apoio;

Aos meus amigos, Alex Sandro Pereira, Alberto Bonamigo, Bruna Mendes, Cleber Guedes, Duván Sánchez Quintana, Fernando Costenaro, Ivan Pigozzo, João Cairo Pereira, Junior B. Zanini, Kauê Riffel, Rafael Horn, Rafael Bernardi e Rodrigo R. Nogueira, agradeço o convívio e bons momentos compartilhados;

Aos meus amigos, Cláudio Schaeffer e Manoel Kolling, agradeço pelas ondas surfadas e os bons momentos compartilhados;

Aos meus queridos amigos, Ivan Mantovani e Jéssica Schimuneck, agradeço pelos bons momentos compartilhados e pelo apoio nos diversos momentos da minha jornada;

Ao mestre Yan Silveira e aos amigos do Jiu-Jitsu, agradeço pelos treinos e pela resenha que ajudaram a fortalecer e distrair a mente;

À Renata Martorano Amorim agradeço o apoio nos diversos momentos da minha jornada e o incentivo que me fez chegar ao término deste trabalho;

Aos meus professores e orientadores, Dr. Régis Henrique Gonçalves e Silva e Dr. Mateus Barancelli Schwedersky, agradeço a orientação no trabalho, por todos os conhecimentos compartilhados, pela infraestrutura disponível no LABSOLDA e pelo incentivo no meu crescimento profissional;

À toda equipe do LABSOLDA agradeço o auxílio nos experimentos realizados ao longo deste trabalho;

Ao Scitec, em especial ao Matheus Santos, agradeço o auxílio nos ensaios mecânicos realizados;

Ao Brasil e à CAPES pelo incentivo financeiro e bolsa de doutorado concebida no âmbito de doutorado para realização e conclusão desse trabalho.

*Demore o tempo que for para decidir o que você quer da vida, e depois que decidir não recue ante nenhum pretexto, porque o mundo tentará te dissuadir.*

*Friedrich Nietzsche*

## RESUMO

A manufatura aditiva com deposição a arco utilizando o processo GMAW é uma tecnologia emergente que desperta grande expectativa em diversos setores industriais devido à capacidade de construir peças com melhor produtividade e menor custo que outras tecnologias como GTAW, PAW e Laser. Além disso, oferece a capacidade de produzir peças com boas propriedades mecânicas e relativa complexidade. No entanto, a implementação efetiva dessa tecnologia enfrenta desafios significativos em relação aos processos convencionais de fabricação, como a dificuldade de obter a geometria desejada em peças que utilizam geometria complexa. Esta tese teve como objetivo central desenvolver um sistema preditivo de parâmetros e diretrizes operacionais para a manufatura aditiva por soldagem a arco, utilizando uma variante CMT do processo de soldagem GMAW. Para alcançar esse objetivo, foram realizadas análises para mapear a faixa operacional dessa variante e investigar os efeitos de diferentes misturas gasosas na dinâmica da transferência e na geometria do cordão. Além disso, foi desenvolvido um sistema de controle de temperatura interpasse com base em um sensor de temperatura infravermelho e uma base refrigerada para fixação do substrato. Foram elaboradas diretrizes operacionais, incluindo o desenvolvimento de algoritmos para sobreposição vertical e horizontal, análise de estratégias de intersecção, conexão e trajetórias de deposição, compiladas em um algoritmo de predição de parâmetros de soldagem e diretrizes operacionais. Os principais resultados obtidos indicam dentre as misturas gasosas avaliadas para o arame ER70S6, a mistura com 8% de CO<sub>2</sub> + Ar mostra-se mais adequada, possibilitando operações em uma faixa de velocidade de alimentação entre 4 e 7 m/min e com velocidades de soldagem entre 30 e 75 cm/min. Além disso, observou-se que a temperatura interpasse acima de 200°C tem um impacto significativo na geometria do cordão. Com o sistema de controle de temperatura interpasse foi possível monitorar e controlar o início de novas camadas sem alterações significativas na geometria do cordão. Na sobreposição vertical, os cordões apresentaram leves variações na largura e altura em relação ao cordão base, sugerindo para o incremento vertical uma diminuição média de 10% no valor da altura do cordão para garantir uma sobreposição consistente. Para a sobreposição horizontal, o modelo criado sugere que a distância entre centros de cordões deve ser igual a 67% da largura do cordão base. Intersecções contínuas entre os cordões depositados foram mais adequadas, evitando acumulações e desvios significativos. Em conexões em caminhos fechados, alternar o ponto de início de cada camada e inverter o sentido a cada camada reduziu desvios ao longo da peça. As propriedades mecânicas das peças demonstraram isotropia e valores adequados para o material utilizado. O algoritmo de predição de parâmetros demonstrou eficácia na segmentação e parametrização das peças de forma adaptativa com base na base de dados e diretrizes pré-estabelecidas. Em conclusão, este trabalho oferece contribuições significativas para a implementação eficiente da manufatura aditiva por soldagem a arco, facilitando a produção de peças com qualidade e eficiência.

**Palavras-chave:** Fabricação aditiva; Alimentação dinâmica; Automação da Soldagem; Soldagem Adaptativa.

## ABSTRACT

Additive manufacturing with arc deposition using the GMAW process is an emerging technology that is generating great expectations in various industrial sectors due to its ability to build parts with better productivity and lower cost than other technologies such as GTAW, PAW, and Laser. Additionally, it offers the capability to produce parts with good mechanical properties and relative complexity. However, the effective implementation of this technology faces significant challenges compared to conventional manufacturing processes, such as the difficulty in obtaining the desired geometry in parts that use complex geometries. This thesis aimed to develop a predictive system of parameters and operational guidelines for arc welding additive manufacturing using a CMT variant of the GMAW welding process. To achieve this goal, analyses were conducted to map the operational range of this variant and investigate the effects of different gas mixtures on transfer dynamics and bead geometry. Additionally, an interpass temperature control system was developed based on an infrared temperature sensor and a refrigerated base for substrate fixation. Operational guidelines were developed, including the development of algorithms for vertical and horizontal overlap, analysis of intersection strategies, connection, and deposition trajectories, compiled into a welding parameter prediction algorithm and operational guidelines. The main results obtained indicate that among the gas mixtures evaluated for ER70S6 wire, the mixture with 8% CO<sub>2</sub> + Ar is more suitable, allowing operations in a feed speed range between 4 and 7 m/min and with welding speeds between 30 and 75 cm/min. Furthermore, it was observed that an interpass temperature above 200°C has a significant impact on bead geometry. With the interpass temperature control system, it was possible to monitor and control the start of new layers without significant changes in bead geometry. In vertical overlap, the beads showed slight variations in width and height relative to the base bead, suggesting a vertical increment of an average 10% reduction in bead height value to ensure consistent overlap. For horizontal overlap, the created model suggests that the distance between bead centers should be equal to 67% of the base bead width. Continuous intersections between weld beads were more suitable, avoiding significant accumulations and deviations. In connections with closed paths, alternating the start point of each layer and reversing the direction each layer reduced deviations along the part. The mechanical properties of the parts demonstrated isotropy and adequate values for the material used. The parameter prediction algorithm demonstrated effectiveness in segmenting and parameterizing the parts adaptively based on the pre-established database and guidelines. In conclusion, this work offers significant contributions to the efficient implementation of arc welding additive manufacturing, facilitating the production of quality and efficient parts.

**Keywords:** Additive manufacturing; Dynamic feeding; Welding automation; Adaptive welding.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Formato de onda de corrente e tensão típicos da variante curto-circuito controlado (CCC) do processo GMAW. ....	33
Figura 2 – Componentes básicos do sistema Fronius CMT: 1 – Fonte de Alimentação; 2 – Cabeçote alimentador; 3 – Buffer de arame; 4 – Tocha.....	35
Figura 3 – Formatos de onda de velocidade de arame instantânea, corrente e tensão típicos da variante CMT do processo GMAW para aço e suas ligas. ....	37
Figura 4 – Macrografias das diferentes versões do CMT ilustrando a distribuição da porosidade, onde: (a) CMT, (b) CMT +P, (c) CMT ADV, (d) CMT +P ADV.....	45
Figura 5 – Tomografia computadorizada via raio-x. a) amostra fabricada com CMT Pulse; b) Amostra fabricada com MIG Pulsado; c) Micrografia da amostra feita com CMT Pulse; d) Micrografia da amostra feita com CMT Pulse.....	46
Figura 6 – Geometria em forma de pá de aço inoxidável duplex; Direita: Vista lateral; Esquerda: vista frontal.....	48
Figura 7 – Comportamento da temperatura em função do tempo para construção das paredes. ....	50
Figura 8 – Seções fechadas; (a) seção quadrada de 50 mm; (b) seção retangular de 200 mm; (c) Seção semicircular de 50 mm de raio. ....	51
Figura 9 – Esquema básico do processo de manufatura aditiva.....	56
Figura 10 – Vista Lateral das paredes fabricadas com trajetória unidirecional e bidirecional. Onde: a) e b) Unidirecional (Deposição da esquerda para direita); c) Bidirecional.....	57
Figura 11 – Esquema de diferentes padrões de sobreposição e suas implicações, onde: a) Falta de sobreposição; b) Sobreposição insuficiente; c) Sobreposição adequada; d) excesso de sobreposição.....	58
Figura 12 – Diagrama esquemático do modelo de sobreposição tangente.....	59
Figura 13 – Comparação experimental entre os métodos descritos, onde: a) Deposição utilizando método otimizado; b) Deposição utilizando método convencional; c) Superfície pós-usinada do método otimizado; d) Superfície pós-usinada do método convencional. ....	61
Figura 14 – Seção transversal dos corpos de prova manufaturados utilizando um modelo sem considerar o espalhamento e considerando o espalhamento.....	62

Figura 15 – Exemplos de validações do sistema, peças na condições near-net shape e pós usinadas. ....	63
Figura 16 – Esquema das estratégias de intersecção adotadas por Venturini, et al [74] .....	64
Figura 17 – Resultados das sobreposições para S3 (Esquerda) e S3_I2 (Direita). ..	64
Figura 18 – Esquema das estratégias de intersecção adotadas por Sousa, et al [75] .....	65
Figura 19 – Temperatura média entre passes e perfil geométrico das paredes em liga de alumínio com abordagens de temperatura entre passes controlada e não controlada.....	66
Figura 20 – Arranjos físicos utilizados nos protótipos, onde A) Arranjo descrito por XIONG, ZHANG, et al. (2013); B) Arranjo descrito por XIONG e ZHANG (2014). ....	68
Figura 21 – Seção transversal de paredes cordão simples. a) Controle em malha aberta; b) Controle em malha fechada. ....	68
Figura 22 – Fluxograma do processo de manufatura aditiva por deposição a arco e linhas de pesquisa exploradas no presente trabalho. ....	71
Figura 23 – Representação esquemática da bancada de experimentos, onde: A) Fonte de soldagem Fronius CMT Advanced 4000R com controlador RCU 5000i; B) Cabeçote de alimentação de arame principal; C) Tocha de soldagem Fronius Robacta; D) Robô antropomórfico Yaskawa Motoman HP20D de 6 eixos e 20 kg de payload; E) Base articulada Motopos MPD250B com 2 eixos e 250 kg de payload; F) Unidade de controle Yaskawa Motoman DX100; G) IHM Teach Pendant DX100; H) Cilindro de gás de proteção para soldagem.....	72
Figura 24 – Disposição dos sensores utilizados para aquisição das variáveis de soldagem, onde: A) SAPV4.0; B) Cabeçote de alimentação; C) Encoder MVA médio; D) Encoder MVA instantâneo; E) Sensor de efeito Hall; F) Cabos para medição de Tensão .....	75
Figura 25 – Disposição dos equipamentos utilizados para realização da filmagem em alta velocidade e aquisição das variáveis de soldagem, onde: A) Unidade de controle da câmera de alta velocidade e periféricos; B) Câmera IDT Y4-S2; C) Iluminação Laser Cavitar; D) Sensor de efeito Hall; E) Sensores para medição de tensão. ....	77
Figura 26 – Método de definição do diâmetro equivalente da gota metálica.....	83

Figura 27 – Comportamento dinâmico do arame expresso pela sua posição instantânea no tempo.....	84
Figura 28 – Comportamento da velocidade instantânea de arame no tempo. ....	85
Figura 29 – Componentes de velocidade extraídas a partir da análise da curva de velocidade instantânea.....	86
Figura 30 – Oscilograma de corrente e tensão sincronizados a velocidade instantânea de arame, com a delimitação de cada trecho referente a amplitude de avanço e recuo do arame. ....	88
Figura 31 –Exemplo de medição do mergulho máximo para a $Vd\_sc\_wait$ de 35 m/min. ....	89
Figura 32 – Disposição dos equipamentos utilizados para realização da filmagem térmica, onde: A) Câmera térmica FLIR SC 7200; B) Laptop munido com software Altair 5.91.010 e C) Plano de interesse captado pela câmera.....	91
Figura 33 – Esquema de posicionamento dos termopares para calibração da emissividade.....	91
Figura 34 – Esquema de medição da temperatura para cálculo do gradiente térmico. ....	92
Figura 35 – Representação esquemática do corte realizado para macrografia. ....	92
Figura 36 – Representação esquemática das regiões de medição das macrografias. ....	93
Figura 37 – Representação esquemática do corte realizado em três trechos para macrografia. ....	95
Figura 38 – Esquema de distribuição dos termopares. ....	104
Figura 39 – Posicionamento da câmera térmica em relação a peça.....	105
Figura 40 – Posicionamento e fixação da peça para aquecimento. ....	106
Figura 41 – Representação esquemática do experimento de validação do sistema de controle de temperatura. ....	108
Figura 42 – Representação esquemática dos cenários de medição adotados para o experimento de validação do sistema de controle de temperatura. ....	109
Figura 43 – Representação esquemática da trajetória utiliza para construção das paredes. ....	111
Figura 44 – Esquema de medição da altura e largura das paredes.....	113
Figura 45 – Esquema de corte para macrografia das paredes.....	113

Figura 46 – Esquema de fabricação dos blocos.....	114
Figura 47 – Esquema básico de sobreposição testado nos blocos.....	115
Figura 48 – Esquema de medição da largura e altura dos blocos.....	116
Figura 49 – Matriz de experimentos utilizada para os experimentos de intersecção. .....	118
Figura 50 – Esquema de deposição dos cilindros para as diferentes estratégias de conexão dos cordões. ....	119
Figura 51 – Esquema de deposição dos cubos para as diferentes estratégias de conexão dos cordões. ....	120
Figura 52 – Dimensões dos triângulos depositados variando os ângulos.....	121
Figura 53 – Representação esquemática das trajetórias adotadas para fabricação das paredes. ....	122
Figura 54 – Dimensões dos corpos de prova de tração segundo a norma ASTM E8 .....	122
Figura 55 – Esquema de extração dos corpos de prova das paredes. ....	123
Figura 56 – Fluxograma do funcionamento do algoritmo de predição de diretrizes e parâmetros para manufatura aditiva.....	126
Figura 57 – Detalhamento dimensional do cilindro e cubo com ressalto utilizados para validação do algoritmo. ....	128
Figura 58 – Detalhamento dimensional de cilindro com derivações (Candelabro) variando os diâmetros utilizado para validação do algoritmo. ....	128
Figura 59 – Detalhamento dimensional de cilindro com derivações (Árvore de Natal) variando os diâmetros utilizado para validação do algoritmo. ....	129
Figura 60 – Detalhamento dimensional do logotipo do LABSOLDA utilizado para validação do algoritmo. ....	129
Figura 61 – Vista isométrica do CAD da abraçadeira com detalhe as regiões reforçadas por MA.....	131
Figura 62 – Momento de instabilidade registrado por filmagem em alta velocidade para VA programada de 5 m/min e mistura C25. ....	136
Figura 63 – Percentual de acertos de reabertura.....	137
Figura 64 – Entropia de Shannon do sinal de corrente de reabertura.....	138
Figura 65 – Registro de colapso prematuro da ponte metálica em correntes elevadas para a VA programada de 8 m/min utilizando C8.....	139

Figura 66 – Registro de gota secundária destacada durante a fase de arco para a VA programada de 8 m/min utilizando C8.....	140
Figura 67 – Aparência superficial dos cordões depositados com a VA programada de 8 m/min e velocidade de deslocamento de 60 cm/min.....	141
Figura 68 – Sobreposição da curva de corrente do processo CMT para diferentes VAs e misturas gasosas. ....	142
Figura 69 – Patamares de corrente medidos para a curva de corrente do processo CMT para diferentes VAs e misturas gasosas. ....	143
Figura 70 – Taxas de correntes medidas para a curva de corrente do processo CMT para diferentes VAs e misturas gasosas. ....	145
Figura 71 – Capturas em alta velocidade do fim do pulso de corrente na fase arco na iminência do avanço do arame.....	146
Figura 72 – Valores médios de corrente, tensão, potência e aporte térmico para o processo CMT com diferentes VAs e misturas gasosas. ....	147
Figura 73 – Tempos de curto-circuito, arco e frequência de destacamento para o processo CMT com diferentes VAs e misturas gasosas. ....	149
Figura 74 – Comportamento do diâmetro de gota equivalente para o processo CMT com diferentes VAs e misturas gasosas. ....	150
Figura 75 – Diferentes condições operacionais do sistema <i>Buffer</i> .....	151
Figura 76 – Oscilogramas do processo CMT com destaque a diferença entre VA lida no cabeçote alimentador e na tocha. ....	152
Figura 77 – Comportamento dinâmico da velocidade arame na tocha para o processo CMT com diferentes VAs e misturas gasosas.....	153
Figura 78 – Decomposição das etapas de amplitude para o avanço e recuo do arame. ....	154
Figura 79 – Comportamento da amplitude de avanço e recuo para processo CMT com diferentes VAs e misturas gasosas. ....	155
Figura 80 – Oscilogramas do processo CMT para diferentes VAs utilizando a mistura gasosa C8. ....	156
Figura 81 – Influência da velocidade avanço sobre o mergulho no processo CMT com VA 4 m/min e gás C8. ....	157
Figura 82 – Medições do avanço em ponte para cada faixa de velocidade de avanço analisada.....	157

Figura 83 – Medições do recuo livre para cada faixa de velocidade de avanço analisada.....	158
Figura 84 – Alongamento máximo da poça da ponte metálica na iminência do destacamento.....	159
Figura 85 – Gradiente térmico obtido com os três gases de proteção para a faixa de VA de 5 m/min.....	161
Figura 86 – Imagem em infravermelho captada pela câmera térmica.....	161
Figura 87 – Comparação da VA média medida no cabeçote alimentador (Bloco de Rolete) e VA média na tocha.....	162
Figura 88 – Aparência superficial dos cordões depositados. ....	163
Figura 89 – Macrografias dos cordões depositados. ....	164
Figura 90 – Medições das principais características dos cordões depositados. ....	165
Figura 91 – Corrente, tensão e velocidade de arame média em função da DBCP. ....	170
Figura 92 – Relação entre VA medida e calculada para as diferentes DBCPs. ....	173
Figura 93 – Velocidades e amplitudes médias de avanço e recuo em função da DBCP. ....	174
Figura 94 – Máximas velocidades de avanço e recuo.....	175
Figura 95 – Tempo médio de arco e curto-circuito. ....	175
Figura 96 – Comportamento da transferência metálica em função da variação de DBCP. ....	176
Figura 97 – Comportamento da estricção em função do tempo.....	177
Figura 98 – Período e frequência de destacamento em função da DBCP para cada VA programada. ....	178
Figura 99 – Diâmetro de gota em função da DBCP para cada VA programada. ....	179
Figura 100 – Taxa de deposição em função da DBCP para cada VA programa.....	179
Figura 101 – Macrografias dos cordões para cada ensaio da matriz de experimentos. ....	181
Figura 102 – Características geométricas em função da VD variando a VA dentro o conjunto referente a DBCP de 15 mm.....	185
Figura 103 – Características geométricas em função da VD variando a DBCP dentro do conjunto referente a VA programada de 6 m/min.....	186
Figura 104 – Valores- <i>p</i> referente ao teste de hipótese aplicado sobre os conjuntos de DBCP, variando a VD, para cada VA programada.....	187

Figura 105 – Valores- <i>p</i> referente ao teste de hipótese aplicado sobre os conjuntos de VD, variando a DBCP, para cada VA programada.....	188
Figura 106 – Coeficientes de correlação para cada VA programada.....	189
Figura 107 – Gráficos de Pareto da variância explicada pelos componentes principais na análise de PCA para as características geométricas para cada conjunto de VA programada variando VD e DBCP. ....	191
Figura 108 – Comparação das cargas fatoriais de DBCP e VD no componente principal de maior variância explicada para cada VA programada. ....	192
Figura 109 – Comparação do aporte térmico em função da velocidade de arame programada e DBCP para cada VD da base de dados.....	194
Figura 110 – Valores- <i>p</i> referentes ao teste de hipótese aplicado sobre os parâmetros de soldagem obtidos para as diferentes temperaturas de substrato testadas. ....	196
Figura 111 – Macrografias da região dos cordões depositados variando a VA e a Temperatura do substrato. ....	197
Figura 112 – Valores- <i>p</i> referentes ao teste de hipótese aplicado sobre as características geométricas obtidas para as diferentes temperaturas de substrato testadas.....	198
Figura 113 – Gráfico das características geométricas em função da temperatura do substrato.....	200
Figura 114 – Gráficos de Pareto da variância explicada pelos componentes principais na análise de PCA para as características geométricas obtidas para cada conjunto de VA programada variando a temperatura do substrato.....	201
Figura 115 – Comparação das cargas fatoriais das características geométricas no componente principal de maior variância explicada para cada VA programada. ....	202
Figura 116 – Valores- <i>p</i> do teste ANOVA para características geométricas dos cordões em comparando as temperaturas de 200 e 300 °C com a temperatura de 100 °C. ....	203
Figura 117 – Detalhamento do flange superior da base do sistema Motopos.....	204
Figura 118 – Detalhamento da mesa de fixação. ....	205
Figura 119 – Resultado da fabricação da mesa de fixação para o Motopos.....	205
Figura 120 – Detalhamento da base refrigerada. ....	206
Figura 121 – Gráfico e simulação da temperatura em função do tempo para os cenários simulados.....	207
Figura 122 – Resultado da fabricação da base refrigerada para o Motopos.....	208

Figura 123 – Gráficos do comportamento da temperatura sob diferentes cenários de experimentação.....	209
Figura 124 – Caminho para localização da entrada digital.....	211
Figura 125 – Fluxograma do funcionamento do algoritmo de controle da temperatura intercamada.....	213
Figura 126 – IHM projetada para o algoritmo de controle de temperatura, onde: A) Conexão com sensor e Arduino; B) Seleção de parâmetros do sensor, temperatura máxima, mínima e média; C) Configuração da temperatura de referência; D) Configuração da emissividade; E) Configuração do tempo de amostragem F) Comando de Início do algoritmo; G) Leitura instantânea de temperatura e H) Sinal de Status, onde: Amarelo – parado; Vermelho – temperatura acima da referência e Verde – temperatura abaixo da referência.....	214
Figura 127 – Esquema do projeto 3D do suporte para o sensor de temperatura infravermelho, onde: A) Sensor de temperatura OMEGA OS-MINIUSB, B) Suporte do sensor de temperatura, C) Tocha Fronius Robact, D) Peça de trabalho e E) <i>Spot size</i> . .....	215
Figura 128 – Resultado da fabricação do suporte e montagem do sensor de temperatura.....	216
Figura 129 – Aparência superficial do cilindro impresso utilizando o sistema de controle de temperatura. ....	216
Figura 130 – Valores de temperatura para cada quadrante da peça depositada....	217
Figura 131 – Medições de altura média de camada para o cilindro impresso.....	218
Figura 132 – Comportamento da VA para cada camada em função da VD.....	219
Figura 133 – Aparência superficial das paredes para cada conjunto de VA e VD. .	220
Figura 134 – Macrografias da região central das paredes para cada conjunto de VA e VD. ....	221
Figura 135 – Esquema de funcionamento do algoritmo de sobreposição.....	224
Figura 136 – Aparência superficial de blocos com boa qualidade depositados para validação do algoritmo de sobreposição. ....	225
Figura 137 – Aparência superficial de blocos com baixa qualidade depositados para validação do algoritmo de sobreposição. ....	226
Figura 138 – Comparação entre as diferentes estratégias de intersecção adotadas. .....	229

Figura 139 – Comportamento da VA média durante a intersecção dos cordões. ...	230
Figura 140 – Aparência superficial dos cilindros com detalhe nas diferentes conexões testadas.....	232
Figura 141 – Aparência superficial dos cubos com detalhe nas diferentes conexões testadas.....	233
Figura 142 – Aparência superficial dos triângulos com diferentes ângulos.....	234
Figura 143 – Aparência superficial as paredes fabricadas utilizando os dois modelos de trajetória. ....	235
Figura 144 – Macrografias da região central das paredes fabricadas utilizando os dois modelos de trajetória.....	236
Figura 145 – Gráficos de tensão x deformação resultantes dos ensaios de tração. ....	237
Figura 146 – Valores- $p$ referentes ao teste de hipótese aplicado sobre dados resultantes dos ensaios de tração.....	238
Figura 147 - Faixa de valores de tensão máxima, tensão de escoamento e alongamento para peças de manufatura aditiva fabricados em AWS ER70S6 relatados na literatura. ....	239
Figura 148 – Resultado da fabricação do cilindro com ressalto. ....	240
Figura 149 – Resultado da fabricação do cubo com ressalto.....	241
Figura 150 – Algumas das Etapas de fabricação do cilindro com derivações (Candelabro). ....	243
Figura 151 – Resultado da fabricação do cilindro com derivações (Candelabro)....	244
Figura 152 – Algumas etapas da fabricação do cilindro com derivações (Árvore de Natal).....	245
Figura 153 – Resultado da fabricação do cilindro com derivações (Árvore de Natal). ....	246
Figura 154 – Resultado da fabricação do logotipo do LABSOLDA. ....	247
Figura 155 – Resultado do processo de reforço por manufatura aditiva em abraçadeira para reparos em dutovias de óleo e gás. ....	249
Figura 156 – Fluxograma do algoritmo de medição de macros.....	269
Figura 157 – Método utilizada para definição da escala utilizada como referência para o algoritmo.....	269

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química nominal do substrato e metal de adição.....	73
Tabela 2 – Matriz de experimentos para o comparativo entre misturas gasosas.....	74
Tabela 3 – Sistema de aquisição portátil (SAP). .....	74
Tabela 4 – Lista de equipamento que compõem o sistema de aquisição de imagens em alta velocidade IDT.....	76
Tabela 5 – Especificações técnicas da câmera FLIR SC 7200.....	90
Tabela 6 – Câmera, lentes e iluminação utilizados para registro das macrográficas. ....	93
Tabela 7 – Matriz de experimentos utilizada para o mapeamento da variante CMT.	94
Tabela 8 – Matriz de experimentos utilizada os verificação da influência da temperatura do substrato. ....	101
Tabela 9 – Especificações técnicas refrigerador chiller Mecalor.....	103
Tabela 10 – Especificações técnicas da câmera FLIR T1030SC.....	104
Tabela 11 – Matriz de experimentos utilizada para os experimentos de com a mesa refrigerada.....	106
Tabela 12 – Especificações técnicas dos equipamentos utilizados no protótipo. ...	107
Tabela 13 – Matriz de experimentos utilizada para a construção das paredes. ....	112
Tabela 14 – Matriz de experimentos utilizada nos ensaios de sobreposição horizontal. ....	116
Tabela 15 – Especificações técnicas do sistema de inspeção por raio-x.....	117
Tabela 16 – Tabela de parâmetros utilizados na fabricação das peças de validação. ....	132
Tabela 17 – Medições dos parâmetros de soldagem referentes aos experimentos alterando a velocidade de arame, DBCP e velocidade soldagem.....	167
Tabela 18 – Corrente média de arco e corrente eficaz em função da VA e DBCP.	173
Tabela 19 – Medições das características geométricas referentes aos experimentos alterando a velocidade de arame, DBCP e velocidade soldagem.....	183
Tabela 20 – Medições dos parâmetros de soldagem referentes aos experimentos alterando a temperatura do substrato. ....	196
Tabela 21 – Medições das características geométricas referentes aos experimentos alterando a temperatura do substrato. ....	198
Tabela 22 – Largura média das paredes para cada conjunto de VA e VD.....	222

Tabela 23 – Altura média das paredes para cada conjunto de VA e VD.....	223
Tabela 24 – Dados de medições e da largura dos blocos e largura teórica.....	227
Tabela 25 – Dados experimentais dos ensaios de tração.....	238
Tabela 26 – Medições realizadas na peça cilíndrica com ressalto.....	241
Tabela 27 – Medições realizadas na peça cúbica com ressalto.....	242
Tabela 28 – Medições da peça cilíndrica com derivações (Candelabro). ....	244
Tabela 29 – Medições da peça cilíndrica com derivações (Árvore de Natal). ....	246
Tabela 30 – Medições da peça com forma baseada no logotipo do LABSOLDA....	248
Tabela 31 – Medições dos reforços realizados sobre a abraçadeira. ....	250
Tabela 32 – Medições realizadas para calibração do algoritmo.....	273

## LISTA DE SÍMBOLOS

Ar	Argônio
C8	Mistura Gasosa com 8% de CO <sub>2</sub> e Ar
C25	Mistura Gasosa com 25% de CO <sub>2</sub> e Ar
CAD	Computer-Aided Design (Desenho Assistido por Computador)
CCC	Curto-Circuito Controlado
CMT	Cold Metal Transfer
DBCP	Distância de Bico ao Trabalho
GMAW	Gas Metal Arc Welding
GTAW	Gas Tungsten Arc Welding
IHM	Interface Homem-Máquina
PAW	Plasma Arc Welding
PCA	Principal Component Analysis (Análise de Componentes Principais)
ROI	Region of Interest (Região de Interesse)
SAP	Sistema de Aquisição Portátil
SH	Corpo de prova sobreposto sentido horizontal
SV	Corpo de prova sobreposto sentido vertical
TH	Corpo de prova com tecimento sentido horizontal
TV	Corpo de prova com tecimento sentido vertical
VA	Velocidade de Alimentação
VD	Velocidade de Deslocamento
VG	Velocidade de Gás
WAAM	Wire and Arc Additive Manufacturing

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>27</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>30</b>
2.1	OBJETIVO GERAL.....	30
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	30
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>32</b>
3.1	FUNDAMENTOS FÍSICOS DA VARIANTE CMT DO PROCESSO GMAW .	32
3.2	MANUFATURA ADITIVA POR ARCO E ARAME (WAAM) .....	41
<b>3.2.1</b>	<b>Breve histórico</b> .....	<b>41</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Manufatura aditiva com TIG e PAW</b> .....	<b>43</b>
<b>3.2.3</b>	<b>Manufatura aditiva com GMAW – CMT</b> .....	<b>44</b>
3.2.3.1	Ligas de alumínio.....	44
3.2.3.2	Ligas de aços inoxidáveis.....	47
3.2.3.3	Ligas de aços carbono.....	50
3.2.3.4	Ligas especiais de fabricação.....	53
3.2.3.5	Síntese do capítulo .....	55
<b>3.2.4</b>	<b>Estratégias de geração de trajetória e controle</b> .....	<b>56</b>
3.2.4.1	Estratégias de sobreposição vertical e horizontal.....	56
3.2.4.2	Intersecção de paredes .....	63
3.2.4.3	Estratégias de controle .....	66
3.2.4.4	Síntese do capítulo .....	69
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>70</b>
4.1	ORGANIZAÇÃO METODOLOGIA DO TRABALHO .....	70
4.2	CARACTERIZAÇÃO E COMPARATIVO DE MISTURAS GASOSAS COM VISTAS A TRANSFERÊNCIA METÁLICA E GEOMETRIA DO CORDÃO .....	72
<b>4.2.1</b>	<b>Critérios de estabilidade para definição de faixa operacional</b> .....	<b>77</b>
<b>4.2.2</b>	<b>Critérios de medição dos aspectos elétricos do processo</b> .....	<b>81</b>
<b>4.2.1</b>	<b>Critérios de medição dos aspectos concernentes à dinâmica do arame no processo CMT</b> .....	<b>84</b>
4.3	MAPEAMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE FAIXA OPERACIONAL DA VARIANTE CMT PARA O ARAME ER70S6 .....	94
4.4	DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE CONTROLE DE TEMPERATURA INTERCAMADA .....	101
<b>4.4.1</b>	<b>Influência da temperatura do substrato na geometria do cordão</b> .....	<b>101</b>
<b>4.4.2</b>	<b>Projeto e desenvolvimento de uma base refrigerada</b> .....	<b>102</b>

<b>4.4.3</b>	<b>Sistema de controle de abertura do arco baseado na temperatura intercamada .....</b>	<b>106</b>
<b>4.5</b>	<b>CONCEPÇÃO DE DIRETRIZES PARA PREDIÇÃO DE PARÂMETROS NA MANUFATURA ADITIVA.....</b>	<b>111</b>
<b>4.5.1</b>	<b>Desenvolvimento de diretrizes para sobreposição vertical.....</b>	<b>111</b>
<b>4.5.2</b>	<b>Desenvolvimento de diretrizes para sobreposição horizontal .....</b>	<b>114</b>
<b>4.5.3</b>	<b>Avaliação de estratégias para intersecção entre cordões.....</b>	<b>117</b>
<b>4.5.4</b>	<b>Avaliação de estratégias de conexão entre cordões e geometrias triangulares.....</b>	<b>118</b>
<b>4.5.5</b>	<b>Avaliação e comparação de diferentes trajetórias de deposição.....</b>	<b>121</b>
<b>4.6</b>	<b>CONCEPÇÃO, DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO DE ALGORITMO DE PREDIÇÃO DE PARÂMETROS PARA MANUFATURA ADITIVA .....</b>	<b>124</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>134</b>
<b>5.1</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO E ANÁLISE COMPARATIVA DE DIFERENTES MISTURAS GASOSAS COM VISTAS A TRANSFERÊNCIA METÁLICA E GEOMETRIA DO CORDÃO.....</b>	<b>134</b>
<b>5.1.1</b>	<b>Análise da estabilidade para definição da faixa operacional .....</b>	<b>135</b>
<b>5.1.2</b>	<b>Análise dos aspectos elétricos do processo em função do gás de proteção .....</b>	<b>142</b>
<b>5.1.3</b>	<b>Análise dos aspectos físicos da dinâmica de transferência metálica .</b>	<b>151</b>
<b>5.2</b>	<b>MAPEAMENTO E ANÁLISE DO PROCESSO COM VISTAS NA MANUFATURA ADITIVA.....</b>	<b>166</b>
<b>5.2.1</b>	<b>Influência da DBCP na velocidade alimentação .....</b>	<b>170</b>
<b>5.2.2</b>	<b>Influência da DBCP e VD nos aspectos geométricos do cordão para cada VA programada.....</b>	<b>180</b>
<b>5.3</b>	<b>ANÁLISES E DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE CONTROLE DE TEMPERATURA INTERCAMADA .....</b>	<b>195</b>
<b>5.3.1</b>	<b>Análise da influência da temperatura do substrato sobre a geometria do cordão de solda.....</b>	<b>195</b>
<b>5.3.2</b>	<b>Projeto e desenvolvimento de base refrigerada .....</b>	<b>203</b>
<b>5.3.3</b>	<b>Desenvolvimento de algoritmos de controle do processo baseado em sensor infravermelho.....</b>	<b>210</b>
<b>5.4</b>	<b>ANÁLISE E CONCEPÇÃO DE DIRETRIZES PARA PREDIÇÃO DE PARÂMETROS NA MANUFATURA ADITIVA.....</b>	<b>219</b>
<b>5.4.1</b>	<b>Sobreposição vertical .....</b>	<b>219</b>
<b>5.4.2</b>	<b>Sobreposição horizontal.....</b>	<b>223</b>
<b>5.4.3</b>	<b>Estratégias de intersecção de cordões .....</b>	<b>229</b>
<b>5.4.4</b>	<b>Estratégias de conexão de cordões e avaliação de geometrias triangulares.....</b>	<b>231</b>
<b>5.4.5</b>	<b>Análise de diferentes estratégias de deposição .....</b>	<b>235</b>

5.5	VALIDAÇÃO DO ALGORITMO DE PREDIÇÃO DE DIRETRIZES E PARÂMETROS PARA MANUFATURA ADITIVA.....	240
6	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>251</b>
7	<b>SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>254</b>
8	<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>255</b>
	<b>ANEXO A – CONEXÕES I/O DO CONTROLADOR DX100.....</b>	<b>268</b>
	<b>APÊNDICE A – ALGORITMO DE MEDIÇÃO PARA MACROGRAFIAS .....</b>	<b>269</b>
	<b>APÊNDICE B – FLUXOGRAMA DETALHADO DA METODOLOGIA DE PROGRAMAÇÃO DA TRAJETÓRIA DOS REFORÇOS POR MANUFATURA ADITIVA NA ABRAÇADEIRA .....</b>	<b>274</b>



## 1 INTRODUÇÃO

Diante da crescente expectativa em relação ao processo de manufatura aditiva, surge a necessidade de compreender suas vantagens e aplicações para direcionar a tecnologia para setores que possam extrair o máximo desempenho desse processo, pois além da fabricação completa de peças e estruturas, a manufatura aditiva pode complementar processos na fabricação de anexos e derivações em peças prontas, produzidas por outros métodos. Além disso, a produção de peças *just in time* se mostra viável, eliminando ou reduzindo significativamente a necessidade de grandes armazéns e estoques volumosos de peças, especialmente para aplicações offshore. Na área de manutenção, é possível reconstruir paredes ou estruturas diversas que foram desgastadas, inclusive em regiões de difícil acesso. Nesse contexto, alguns desses setores podem aproveitar o uso de equipamentos já operacionais na indústria para novas funções, o que aumenta a lucratividade, a competitividade e a independência das empresas em relação aos fornecedores.

A manufatura aditiva por deposição a arco (WAAM, do inglês *wire and arc additive manufacturing*) é um processo de fabricação emergente que vem ganhando bastante destaque no Brasil e no mundo, devido à sua capacidade de produzir peças complexas com geometrias intrincadas e personalizadas, combinando materiais e propriedades mecânicas. Além disso, o WAAM se destaca pela maior produtividade e menor custo dos equipamentos em relação a processos de manufatura aditiva baseados em Laser.

Este processo concentra-se na fabricação de componentes por meio da deposição controlada de material ao longo de uma trajetória predefinida, onde a fusão desse material é obtida através da ação de um arco elétrico. No processo GMAW (*Gas Metal Arc Welding*), o arco elétrico é estabelecido entre o substrato e um arame eletrodo consumível. Esse arame é alimentado continuamente pela tocha de soldagem e fundido pelo arco elétrico, depositando o material de forma controlada conforme avança ao longo da trajetória de deslocamento. Por outro lado, nos processos GTAW (*Gas Tungsten Arc Welding*) e PAW (*Plasma Arc Welding*), o arco elétrico é formado entre um eletrodo não-consumível, geralmente de tungstênio, e o substrato. Nesses processos, o material de adição é adicionado na região do arco, onde é fundido e depositado conforme necessário para formar a peça desejada [1].

A definição do processo de deposição para manufatura aditiva dependerá da complexidade da peça e do material de fabricação. Os processos autógenos com alimentação externa, apesar da vantagem de independência da corrente de soldagem da alimentação de material, tendem a apresentar maiores dificuldades na aplicação em manufatura aditiva, devido a variabilidade da direção de alimentação em trajetórias multidirecionais, uma vez que o alimentador é fixo adjacente ao arco, o que não ocorre no processo GMAW, onde a alimentação é coaxial ao arco, fazendo deste o processo o mais aplicado na manufatura aditiva por deposição a arco atualmente.

No contexto atual, a manufatura aditiva por soldagem tem ocupado um lugar de alta expectativa, principalmente devido à sua capacidade de produzir peças com alta complexidade e com materiais que seriam inviáveis pelos processos convencionais de fabricação, devido aos altos custos e à complexidade operacional. Nesse campo, os processos baseados em manufatura aditiva utilizando arame e arco, podem apresentar taxas de deposição expressivamente altas, produzindo peças em uma condição semiacabada, o que exige remoção de material na pós-usinagem para ajuste de superfície e tolerâncias. Entretanto, mesmo nessa condição semiacabada, a técnica WAAM demonstra, utilizando a razão *buy-to-fly*<sup>1</sup>, uma redução significativa no desperdício de matéria-prima, de aproximadamente 30% a 50%, em comparação com os processos convencionais subtrativos [2–5].

Pela elevada taxa de deposição e dificuldade de controlar a geometria do depósito, o processo WAAM apresenta diversos desafios. Um dos principais desafios trata-se da relação *CAD-to-part*, ou seja, à integração entre o projeto assistido por computador (CAD) e a fabricação do componente físico (*part*). No contexto da manufatura aditiva, essa relação envolve várias etapas cruciais. Destacam-se o planejamento e parametrização do processo, isto é, os parâmetros de soldagem e as diretrizes operacionais necessárias a serem programadas na trajetória, as quais devem garantir que, ao final do processo, a peça atenda aos requisitos dimensionais e mecânicos estabelecidos [6–8]. Diante desse cenário, torna-se imperativo mapear e compreender os fenômenos físicos relacionados à transferência metálica do processo

---

<sup>1</sup> Este termo, originário da indústria aeroespacial, estabelece a razão entre o volume inicial da matéria-prima e o volume final do produto acabado. Neste contexto, a principal vantagem dos processos de manufatura aditiva reside no fato de apresentarem um fator BTF igual ou próximo a 1, o que é significativamente mais baixo do que os valores médios de aproximadamente 11 encontrados nos processos de fabricação convencionais (subtrativos), como mostrado por Allen, 2006 [5].

de deposição adotado e seu impacto no perfil geométrico dos cordões depositados produzidos.

Nesse contexto, processos de soldagem de alta tecnologia embarcada são extensivamente utilizados na manufatura aditiva, devido ao maior nível de controle da transferência metálica e das variáveis de soldagem, destacando-se a variante com alimentação dinâmica do processo GMAW, CMT (*Cold Metal Transfer*). Conforme aborda a literatura, o sistema CMT confere controle geométrico ao depósito, alta estabilidade e possibilita altas taxas de deposição, características essas interessantes para a fabricação de peças por manufatura aditiva. [2, 9–12]. Entretanto, mesmo ao aplicar equipamentos e processos de elevada confiabilidade, a parametrização de uma operação de manufatura aditiva transcende o processo de soldagem e se estende ao controle do aporte térmico, temperatura interpasse ou intercamada, planejamento e controle da trajetória, dentre outras variáveis. A negligência em relação a esses aspectos pode impossibilitar as operações de manufatura aditiva [3, 6, 13–16].

Portanto, nota-se que a manufatura aditiva por deposição a arco com o processo GMAW destaca-se dentre os demais devido a relativa simplicidade e baixo custo dos equipamentos, facilitando a adesão, bem como seu desenvolvimento. Sendo assim, cabe à comunidade acadêmica e à indústria orientar e fundamentar as expectativas em torno desse processo, identificando os desafios e demandas da indústria em geral. A partir disto, por meio da aplicação do método científico, criar bases sólidas de conhecimento sobre essa tecnologia, atendendo assim às demandas geradas e promovendo seu desenvolvimento contínuo. Sendo assim, destaca-se a relevância do desenvolvimento tecnológico nacional na área de manufatura aditiva por soldagem GMAW, uma vez que a maior parte do conhecimento sobre procedimentos e operações nesse campo provém de outros países e grande parte da tecnologia está fechada em softwares comerciais de custo elevado, que não são integráveis com equipamentos mais simples como robôs mais antigos ou manipuladores CNC.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Esta tese tem como objetivo geral desenvolver um sistema preditivo de parâmetros e diretrizes operacionais para manufatura aditiva por soldagem a arco utilizando uma variante CMT do processo de soldagem GMAW. Para isso, através de análises aprofundadas do funcionamento da tecnologia CMT, da compilação de parâmetros de processo e melhores práticas identificadas para manufatura aditiva, pretende-se criar uma base de conhecimento, a qual será fundamentada em estudos experimentais e análises teóricas. Esse sistema permitirá a otimização das operações de manufatura aditiva, aumentando a eficiência da parametrização, a assertividade na obtenção da geometria desejada, qualidade e a viabilidade da fabricação de peças. Desse estudo resultará a expansão do conhecimento acerca dos fenômenos físicos envolvidos no processo de soldagem GMAW com alimentação dinâmica, incluindo as melhores práticas para as operações de manufatura aditiva.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar o funcionamento e mecanismo de transferência metálica da variante GMAW com alimentação dinâmica (CMT) sob diferentes condições de operacionais de velocidade de arame e teores de CO<sub>2</sub> na mistura gasosa para o arame de aço carbono AWS ER70S-6 de 1,2 mm de diâmetro.
- Mapear e avaliar faixa operacional da variante CMT, concentrando-se na compreensão da influência das variáveis de soldagem, distância bico de contato peça (DBCP), velocidade de deslocamento e velocidade alimentação sobre o perfil geométrico dos depósitos, visando a aplicação na manufatura aditiva.
- Analisar a influência da temperatura sobre a geometria dos cordões, projetar uma base refrigerada para operações de manufatura aditiva e desenvolver um sistema de controle de temperatura intercâmara integrado à célula de manufatura aditiva.
- Mapear e definir diretrizes operacionais e modelos analíticos para manufatura aditiva por meio da análise da sobreposição vertical e

horizontal, intersecções, conexões e trajetórias de deposição, visando fornecer um direcionamento que atenda a construção de peças com diferentes geometrias.

- Desenvolvimento de um algoritmo de predição de parâmetros e diretrizes operacionais para produção de peças via manufatura aditiva por soldagem a arco.
- Aplicar os métodos desenvolvidos na fabricação de diferentes peças e avaliar a performance e eficiência do método observando as características geométricas as peças produzidas.
- Construir uma base de conhecimento técnico e científico, visando o desenvolvimento da manufatura aditiva e sua aplicação como processo de fabricação.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, serão abordados os fundamentos essenciais para o entendimento da pesquisa desenvolvida ao longo dessa tese. Inicialmente, serão apresentados conceitos acerca da soldagem GMAW, suas principais variantes, concentrando-se na versão com alimentação dinâmica (CMT). Esses conceitos serão a base para compreender os estudos analisados na seção que irá tratar da manufatura aditiva com processos de soldagem. Em seguida, serão apresentados os principais conceitos acerca da manufatura aditiva por arco e arame através de trabalhos científicos correlacionados.

#### 3.1 FUNDAMENTOS FÍSICOS DA VARIANTE CMT DO PROCESSO GMAW

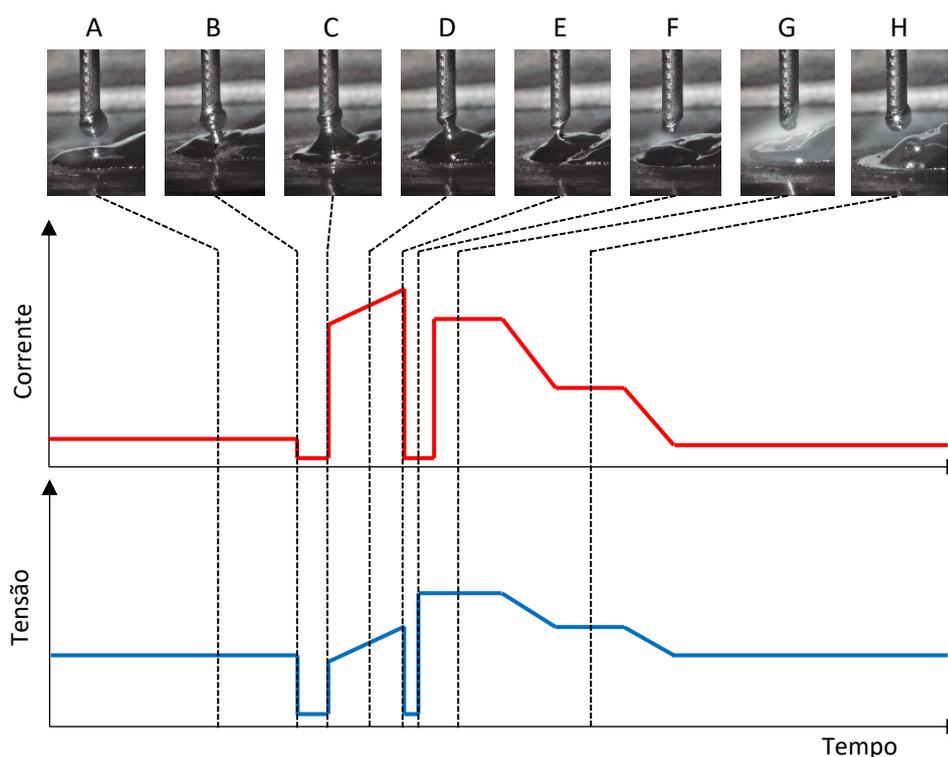
Buscando oferecer vantagens em relação ao GMAW Convencional com transferência por curto-circuito que utiliza fontes com regulagem de tensão, novas variantes que utilizam a modulação da corrente foram desenvolvidas, impulsionadas pelo avanço na eletrônica, bem como do entendimento dos fenômenos físicos envolvidos na transferência metálica foi possível criar métodos de controle, por meio da modulação do formato de onda de corrente. Com isto, variantes do processo GMAW foram desenvolvidas.

Um primeiro nível de sofisticação são as variantes classificadas como curto-circuito controlado e, como o nome sugere, concentra-se em controlar a forma de onda de corrente elétrica durante todas as etapas da transferência metálica, por meio da predição do contato e da ruptura da ponte metálica. Isso, quando em funcionamento adequado, promove maior estabilidade ao processo, permitindo o controle do diâmetro da gota, altura do arco, aporte térmico e da geometria do depósito final. Como resultado, tem-se uma transferência metálica, essencialmente por tensão superficial, que resulta em destacamentos suaves, quase sem respingos e fumos metálicos, frequentemente causados pelo rompimento abrupto da ponte metálica em altas correntes [12, 17–19].

Nesse contexto, algumas empresas destacam-se no desenvolvimento de suas versões de curto-circuito controlado, sendo estas: WiseRoot e WiseThin da empresa Kemppi, STT (Surface Tension Transfer) da empresa Lincoln Electric, RMD (Regulated Metal Deposition) da empresa Miller, ColdArc da empresa EWM, LSC (Low Spatter Control) da empresa Fronius, CCC (Curto-Circuito Controlado) da empresa

brasileira IMC, entre outros. Cada empresa apresenta um nome comercial para sua variante, apresentando pequenas modificações em patamares específicos da forma de onda e no controle, que podem conferir alguma característica distinta dos demais [12, 20]. Para ilustrar o formato de onda de corrente típico dessas variantes, é apresentada na Figura 1 a forma de onda da variante CCC do processo GMAW, uma variante concebida dentro do escopo das atividades de P&D do LABSOLDA. De maneira geral, todas essas variantes funcionam de forma semelhante, isto é, concentram-se na redução da corrente durante a iminência do contato (Figura 1B) e na iminência da ruptura da ponte metálica (Figura 1E), por meio da predição desses fenômenos através da tensão, o que confere maior estabilidade, redução de respingos e fumos metálicos.

Figura 1 – Formato de onda de corrente e tensão típicos da variante curto-circuito controlado (CCC) do processo GMAW.



Fonte: Autor.

Em uma categoria de maior nível de sofisticação no controle, verifica-se uma versão GMAW que vai além do controle da forma de onda de corrente, controlando sincronizadamente à dinâmica de deslocamento do arame eletrodo. Esse conceito de processo pode ser denominado GMAW com destacamento de gotas mecanicamente assistidas ou GMAW com alimentação dinâmica (AD) [12].

Nesta versão, a transferência metálica ocorre pela composição da ação da força de tensão superficial aliado ao recuo do arame-eletrodo que é sincronizado com a forma de onda de corrente (efeito *pinch*). Esse movimento de avanço e recuo é gerado por meio de um servomotor de elevada dinâmica, o qual é integrado a tocha de soldagem. Esse sistema juntamente com o sistema de controle de corrente integrado a fonte de soldagem proporciona ao GMAW-AD alta controlabilidade da geometria do cordão depositado e da energia aportada, além de uma transferência metálica suave, sem respingos e pouca geração de fumos [11]. Este conceito de GMAW com alimentação dinâmica foi inicialmente desenvolvido e patenteado pela empresa Fronius e recebeu o nome comercial de CMT (*Cold metal transfer*). Segundo o fabricante, o CMT foi desenvolvido originalmente para a união de alumínio em aço. Porém, devido ao maior nível de controle da transferência metálica e sua boa performance em outros materiais, o CMT vem sendo extensivamente aplicado na manufatura aditiva [12, 20–22].

O sistema CMT é composto por uma fonte, cabeçote alimentador de arame e tocha que, assemelha-se a um sistema push-pull. O principal diferencial fica por conta do sistema de alimentação de arame e seu controle, que deve atender ao requisito de movimento de avanço e recuo em frequências bastante elevadas, podendo chegar em até 130 Hz. Para esse objetivo, a alimentação dinâmica do arame é feita por um sistema composto por dois motores, um na tocha e outro no cabeçote alimentador, desacoplados por meio de um dispositivo denominado buffer, instalado no meio do mangote, o qual visa mitigar a dessincronização gerada de forma indireta pelo avanço e recuo do arame ao longo do processo. A Figura 2 mostra a configuração básica dos componentes do CMT [11, 23, 24].

Figura 2 – Componentes básicos do sistema Fronius CMT: 1 – Fonte de Alimentação; 2 – Cabeçote alimentador; 3 – Buffer de arame; 4 – Tocha.



Fonte: Adaptado de Marques [24].

O funcionamento do CMT ser descrito em 7 etapas, conforme demonstra o esquema da Figura 3, que mostra os formatos de onda de velocidade de arame instantânea, corrente e tensão típicos da variante CMT para o aço. Na etapa A, ocorre o avanço do arame-eletrodo em alta velocidade, até 50 m/min, com uma corrente de base em nível moderado até o contato da gota metálica com poça de fusão. Nessa etapa, o sistema de controle ao identificar o curto-circuito por meio do monitoramento da queda de tensão elétrica, reduz rapidamente (elevada  $di/dt$ ) a corrente elétrica para um nível baixo, promovendo um contato suave entre a gota metálica e poça de fusão. Essa redução da corrente elétrica contribui para redução de emissão de respingos gerados pela ação das forças eletromagnéticas repulsivas e fumos devido a vaporização metálica.

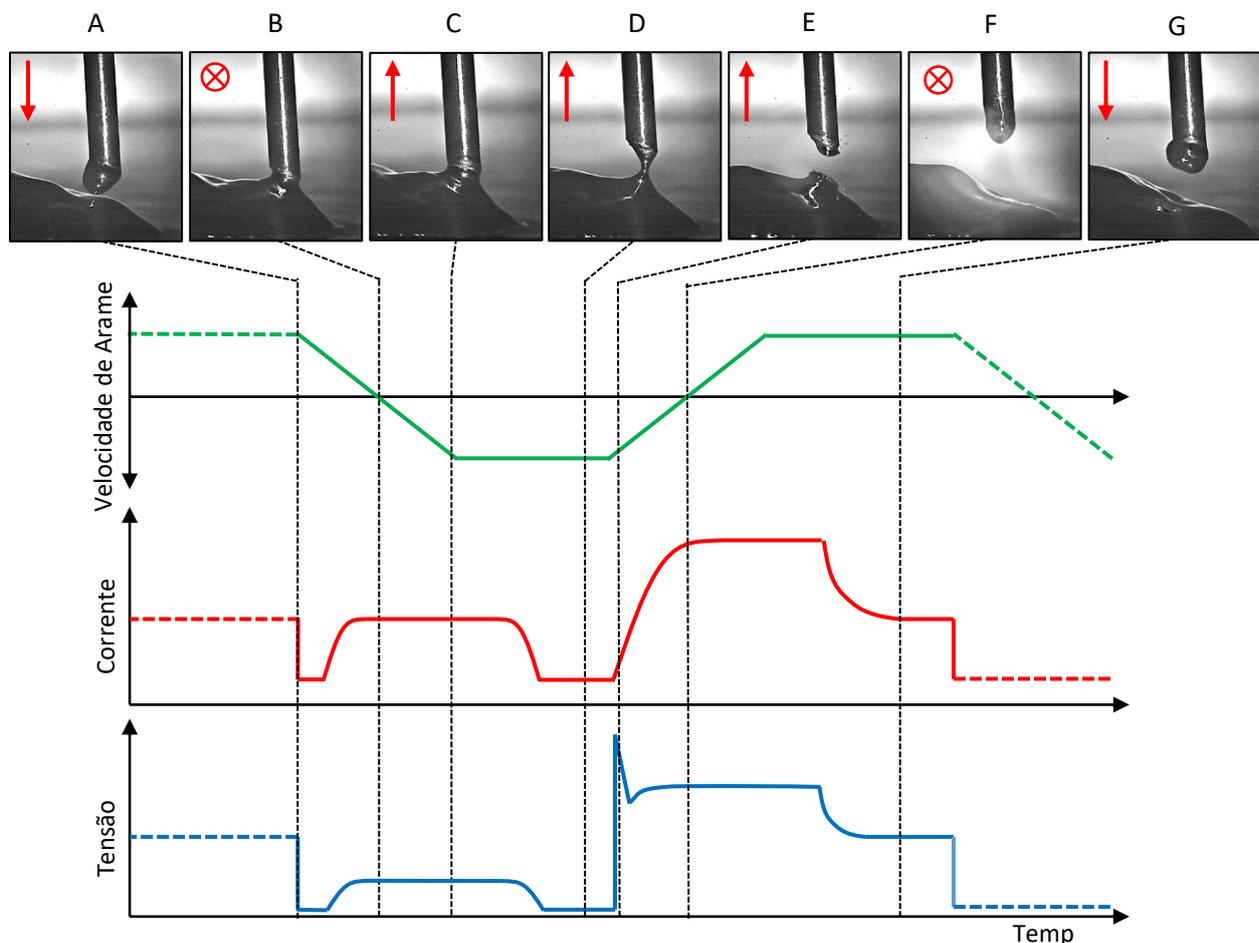
Na etapa B, se estabelece a ponte metálica por meio do assentamento da gota metálica. Devido a elevada velocidade de contato e à dinâmica de desaceleração do servomotor, o arame continua avançando em direção a poça por alguns milissegundos até a total parada do movimento de avanço. Em paralelo a ocorre um pulso de corrente, presente apenas nos formatos de onda de corrente destinadas ao aço carbono e as ligas de níquel e cromo. Esse pulso de corrente na fase curto-circuito, segundo Galeazzi et al. [25], promove principalmente um aumento da estabilidade do processo, uma vez que a intensidade da força de Lorentz resultante do pulso de corrente, juntamente com a retração do arame-eletrodo, facilita a estrição da ponte metálica. Esse comportamento também foi verificado por Sun, et al. [26] que, no entanto, utilizaram titânio em seus experimentos.

Na etapa C, a ponte metálica é estabelecida e inicia-se o recuo do arame-eletrodo, ou seja, a reversão do movimento do arame-eletrodo, bem como a estricção da ponte metálica devido a composição das forças eletromagnética e tensão superficial.

Na etapa D, o sistema de controle por meio do monitoramento da tensão elétrica realiza a predição da reabertura do arco. Na etapa E, devido ao recuo do arame ocorre o rompimento da ponte metálica e transferência de gota pela ação da força de tensão superficial em um nível baixo de corrente. No instante que ocorre à reabertura do arco o arame continua recuando e inicia-se uma rampa de subida corrente.

A etapa F é marcada pela parada total do arame e início de um pulso de corrente de nível alto para formação de nova gota metálica e aquecimento da poça metálica. Na etapa G, ocorre o fim do pulso de corrente e início de uma rampa de descida de corrente, bem como o avanço do arame-eletrodo, iniciando um novo ciclo de transferência.

Figura 3 – Formatos de onda de velocidade de arame instantânea, corrente e tensão típicos da variante CMT do processo GMAW para aço e suas ligas.



Fonte: Autor.

Além do CMT, outras versões foram desenvolvidas, as quais combinam formas de onda e estratégias de deposição como pulsado e pulsado CA (Corrente alternada). Neste contexto, pode-se citar a versão CMT Pulse (CMT +P) que combina a versão Pulsada do processo GMAW (Transferência em voo livre) com a transferência por curto-circuito com alimentação dinâmica (CMT). Outra versão é o CMT Advanced (CMT adv), que combina à dinâmica de destacamento com a troca de polaridade da corrente elétrica, e a versão CMT Pulse Advanced (CMT +P adv), que como o nome sugere combina as duas versões supracitadas [27]. Nessa tese, os estudos serão focados na variante CMT.

Visto o funcionamento da variante CMT, torna-se evidente o seu potencial disruptivo na soldagem GMAW, devido à sua alta estabilidade e eficiência em relação ao processo GMAW. Em comparação ao processo GMAW convencional, os

resultados de Dutra et al. [28], que focaram na soldagem de alumínio AA5183, demonstram que o CMT confere uma maior estabilidade e melhor acabamento da raiz, tanto no verso quanto na superfície, devido à adequada cadência e repetibilidade dos períodos de transferência para o CMT. Elrefay [29], na soldagem da liga de alumínio AA7075, mostra uma melhora significativa nas propriedades de resistência a tração e ductilidade utilizando CMT, em comparação ao GMAW convencional. Além disso, o autor destaca a redução de porosidade, isenção de trincas e redução da dureza na zona afetada pelo calor (ZAC) em relação ao metal de base (MB).

Na soldagem de aço carbono, Grzybicki e Jakubowski [30] mostraram que, em comparação com o processo GMAW convencional, o CMT apresenta vantagens, como baixa energia, isenção de respingos e possibilidade de altas velocidades de soldagem, permitindo assim a soldagem de chapas finas. No entanto, os autores ressaltam a problemática de fusão incompleta, especialmente para juntas sobrepostas, a qual pode ser mitigada aumentando o comprimento do arco.

Estendendo o estudo para a soldagem de chapas de aço galvanizadas, às quais apresentam grande tendência de formação de poros, devido ao aprisionamento de vapores de zinco na poça de fusão. Ahsan, et al. [31] e Ahsan, et al. [32], aplicando o CMT, demonstraram o mecanismo de formação desses poros em função do vapor de zinco, e como o aumento do aporte térmico auxilia no escape dos vapores aprisionados antes do início da solidificação da poça de fusão. Em conjunto com o aumento do aporte térmico, a aplicação do CMT oferece um mecanismo auxiliar para o escape dos vapores. Esse mecanismo está relacionado ao modo de transferência metálica do CMT, o qual, devido à oscilação do arame-eletrodo em alta frequência, tende a interagir com a convecção da poça de fusão, facilitando o escape desses vapores.

O CMT, aplicado na soldagem de aços inoxidáveis duplex, como demonstrado por Luchternberg, et al. [33], no revestimento de aço ASTM A516-Gr60, resultou em depósitos com baixa diluição, com valores entre 8,5% e 11,7%. Além disso, observou-se um aumento na resistência a abrasão, apesar da dureza permanecer, na média, constante. Esse aumento da resistência a abrasão, sem modificações expressivas na dureza, pode ser atribuído aumento de austenita secundária, devido ao aumento do aporte de calor. Contudo, Luchternberg, et al. [33] destacam que o aumento da austenita secundária, resultou em uma diminuição da resistência a corrosão em

comparação com os valores estabelecidos para chapas de laminadas de aço inoxidável duplex ASTM A240. No entanto, para as outras condições de menor energia, os resultados foram similares ou melhores em termos de resistência à corrosão do que os das chapas laminadas.

Analogamente, Rozmus-Górnikowska, et al. [34] demonstraram a influência do CMT na microestrutura e composição química do revestimento com Inconel 625 de tubos de caldeira fabricados em aço grau 16Mo3. Como principal resultado destaca-se a isenção de defeitos e baixo nível de difusão de ferro na superfície nas regiões de sobreposição, cerca de 3%. Além disso, observou-se baixa diluição no substrato e uma pequena ZAC. Utilizando o mesmo material, no entanto, no revestimento de aço inoxidável 316L, Evangeline e Sathiya [35] destacaram isenção de defeitos de soldagem e a baixa diluição no revestimento com o CMT. Além disso, demonstram um desempenho superior à corrosão na região revestida, especialmente na região de interface, em comparação ao substrato, indicando uma excelente proteção fornecida pelo Inconel 625.

Em continuidade, Benoit et al. [36] e Ola e Doern [37], na soldagem de Inconel 718, demonstraram que o CMT também se mostra adequado, produzindo também ZACs de pequena dimensão ( $< 0.5$  mm) em comparação com o GMAW convencional. Embora o tamanho e a geometria dos cristalitos na zona de solda sejam semelhantes aos obtidos no processo GMAW convencional, os resultados indicam que o CMT possui boas propriedades para a soldagem do Inconel 718, uma vez que não foram detectados defeitos e o processo introduziu níveis mais baixos de tensões residuais no metal quando comparado ao GMAW convencional, corroborando com os resultados de Rozmus-Górnikowska, et al. [34] e, Evangeline e Sathiya [35].

O CMT aplicado à soldagem de aço e alumínio também apresenta resultados promissores. De acordo com Karim, et al. [38], na soldagem de alumínio 4043 em substrato de aço inoxidável 316L, o CMT demonstrou um bom desempenho, produzindo peças com baixo índice de defeitos de soldagem. O composto intermetálico resultante apresentou composição predominantemente de  $\text{FeAl}_2\text{Si}$  e espessuras entre 5 e 18  $\mu\text{m}$ , as quais aumentaram em função do aporte térmico. Além disso, destaca-se a resistência à tração que atingiu aproximadamente 130 MPa, um valor bastante relevante frente a literatura para estruturas bimetálicas de aço/Al. Não obstante, as amostras fabricadas com alto aporte térmico apresentaram um composto

intermetálico mais espesso na interface aço/Al, resultando em uma interface mais frágil e degradação das propriedades mecânicas.

Analogamente, no estudo da soldagem de alumínio em aço borado com o CMT, Cao, et al. [39] apontam que as juntas de Alumínio e aço galvanizado apresentaram maior resistência à tração do que as de outros tipos de aço revestido e não revestido (por exemplo, não revestido, revestido com Al-Si e galvanizado). Além disso, foi verificado que a espessura da camada interfacial da junta Al/ aço variou entre 2 e 5  $\mu\text{m}$ . Em outro estudo aplicando o CMT na soldagem de alumínio com aço, Cao, et al. [40] apresentaram uma otimização dos parâmetros do processo de soldagem pelo método Taguchi. Como principal resultado, destaca-se a degradação da zona afetada pelo calor do alumínio e a espessura do composto intermetálico foram minimizadas controlando o aporte térmico dentro de 100–200 J/mm.

Na soldagem de titânio, Sun, et al. [26] destacam a influência do formato de onda de corrente do CMT na soldabilidade da liga titânio Ti-6Al-4V. Os resultados mostraram que a frequência de destacamento é fortemente influenciada por uma característica presente na forma de onda de corrente do CMT, isto é, um pulso de corrente na fase de curto-circuito.

De modo geral, é possível constatar a ampla aplicabilidade do CMT na soldagem de uma variedade de materiais, sejam eles similares ou dissimilares. O CMT, conforme evidenciado pela literatura analisada, destaca-se pela sua capacidade de controlar o aporte térmico e a geometria do depósito. Além disso, o modo de transferência metálica confere características únicas ao cordão, tanto em termos de geometria quanto, em alguns casos, de microestrutura.

## 3.2 MANUFATURA ADITIVA POR ARCO E ARAME (WAAM)

### 3.2.1 Breve histórico

Atualmente, apesar do termo WAAM ser amplamente aceito como parte da terminologia de manufatura aditiva ao longo dos últimos anos, o conceito de fabricação de componentes completos a partir da deposição de material utilizando soldagem perpassa os 100 anos. Com o surgimento e evolução das tecnologias de soldagem, muitos pesquisadores aplicaram técnicas de soldagem na fabricação de diferentes formas, que foram reconhecidas por nomes, como: soldagem de formas (*Shape-welding*), fusão de formas (*Shape-melting*), prototipagem rápida baseada em soldagem (*Rapid prototyping welding-based*), fabricação de formas sólidas livres (*Solid freeform fabrication*), deposição de metal em forma (*Shape metal deposition*), Soldagem 3D (*3D welding*), entre outros [41].

A origem do processo WAAM pode ser remontada à década de 1920, quando Baker [42] depositou um pedido de patente, propondo a utilização do arco elétrico como fonte de calor e arames de aço como matéria-prima para depositar ornamentos metálicos em uma trajetória helicoidal. Na década seguinte, outra patente, depositada por Shockey [43], que descreveu o uso de soldagem para revestimento, concentrando-se na análise das melhores práticas para sobreposição dos cordões depositados.

Posteriormente, Ujiie [44] demonstrou a técnica para a formação de um vaso de pressão de seção transversal circular fabricado unicamente por deposição progressiva do metal de solda. O autor, também discutiu a usinagem das camadas interna e externa da peça formada. Nos anos seguintes, Ujiie [45] demonstrou a capacidade de aumento da taxa de deposição por meio do desenvolvimento de uma técnica de soldagem utilizando GMAW com três arames.

Em 1980, uma forma de manufatura aditiva utilizando arco e arame que acendeu foi o intitulado “*shape-welding*” esta técnica baseava-se, em geral, na fabricação de peças integralmente constituídas de metal depositado por arco submerso (SAW)<sup>2</sup>. Ao passo que, este método foi empregado na fabricação de

---

<sup>2</sup> Processo de soldagem baseado em curto-circuito com proteção sólida de fluxo granular, esta técnica é destinada quando há necessidade de altas taxas de deposição ou componentes de grandes dimensões.

componentes para indústria nuclear destinada a produção de energia elétrica. Utilizando a técnica *shape-welding* Kussmaul, Schoch e Luckow [46] demonstram a fabricação de um componente de grande escala por meio do processo SAW tandem, empregando a liga metálica 10MnMoNi55. Neste experimento, foi gerada uma taxa de deposição de 20 kg/h. Os autores discutiram o comportamento de tração e impacto da peça final e destacaram a necessidade de desenvolvimento de materiais de enchimento especiais para a utilização do *shape-welding* via arco submerso.

No Brasil, em 1986, Moraes, Krausser e Echeverria [47] descrevem a fabricação de um bocal de grande diâmetro (aprox. 1000 mm) integralmente manufaturado utilizando a técnica *shape-welding* utilizando o processo SAW arco submerso, nas instalações do NUCLEP no RJ. Em comparação com um mesmo componente, porém, fabricado por forjamento a peça fabricada por manufatura aditiva apresentou propriedades mecânicas e tenacidade melhores do que as observadas nos bocais similares em componentes forjados. Em relação ao aspecto econômico, os autores verificaram que a peça fabricada por *shape-welding* apresentou menor custo em comparação a seu similar forjado.

Na década de 1990, a Rolls Royce junto com a universidade de Cranfield mostrou interesse na fatura aditiva de componentes de motores aeronáuticos utilizando a manufatura aditiva com liga titânio e Inconel. Nesse contexto, nos anos seguinte perpassando os anos 2000, várias abordagens de modelagem teórica e prática vem sendo empreendidas para estudar e desenvolver a tecnologia WAAM [41].

Com a evolução das tecnologias como a robótica e a computação no setor industrial houve o reinvento das técnicas de manufatura em geral. Além disto, a maioria dos processos de fabricação foram em parte reinventados, alguns mais e outros menos. Com esses avanços, os sistemas de manufatura aditiva por soldagem e híbridos vêm sendo beneficiados, possibilitando o desenvolvimento e aplicação de novas variantes dos processos clássicos (GMAW, GTAW, PAW e SAW), bem como o direcionamento para setores específicos da indústria, onde a produção de peças complexas e altamente personalizadas é limitada pelos métodos convencionais de manufatura, devido ao custo da matéria-prima, necessidade de ferramentas de elevado custo e mão de obra altamente especializada [41, 48, 49].

Neste trabalho, serão abordados com ênfase os estudos baseados no processo GMAW e suas variantes, em especial a variante com alimentação dinâmica CMT, foco do escopo desta pesquisa.

### **3.2.2 Manufatura aditiva com TIG e PAW**

A Manufatura aditiva utilizando os processos TIG e PAW requerem um sistema de alimentação externa, o qual deve alimentar material durante o processo de deposição preferencialmente na mesma direção. Portanto, a tocha de soldagem ou o substrato deve ser colocado em movimento relativo, levando a um planejamento de trajetória complexo [4].

Na tentativa de solucionar o problema da direção de alimentação no processo GTAW, Opderbecke e Guiheux [50] desenvolveram um novo conceito de tocha GTAW, denominada TOPTIG. Esse conceito utiliza um sistema de alimentação de arame tangencial, formando um ângulo de 20° em relação ao eletrodo. Isso aproxima significativamente o arame do eletrodo em comparação com outros dispositivos de alimentação, o que tende a mitigar a problemática da alimentabilidade.

Na manufatura aditiva, Taberner et al. [51] realizaram uma comparação entre o CMT, TOPTIG e EWM Tretrix PAW na fabricação de paredes em aço inoxidável 316L e titânio (Ti-6Al-4V), sobre a perspectiva de taxas de deposição. Em seus resultados, o TOPTIG apresentou melhores propriedades para aço inoxidável, apresentando um comportamento homogêneo das estruturas, independentemente da direção (isotropia). No entanto, sua menor eficiência, em comparação ao CMT, não permite taxas de deposição elevadas (máximo de 1,5 kg/h) e torna necessário o uso de uma mistura ativa de gás de proteção para ganhos relevantes em taxas de deposição como, por exemplo, para o titânio. No mesmo contexto, Wang, et al. [52], na caracterização de paredes produzidas utilizando o processo GTAW com alimentação de arame de Ti-6Al-4V, mostraram que, em comparação com uma barra forjada, não houve mudanças significativas, mas houve melhora em algumas propriedades, como a resistência à fadiga.

O PAW aplicado a manufatura aditiva de titânio, conforme descrito por Lin, et al. [53] e Bai, et al. [16], se mostra uma alternativa interessante, devido a densidade de energia possível com PAW, o que leva a taxas de deposição mais elevadas e a texturas de superfície mais suaves em relação ao GTAW. Ambos os autores relatam

uma melhora das propriedades mecânicas e metalúrgicas na aplicação desse processo na fabricação de componentes de motores aeronáuticos.

No entanto, os processos GTAW e PAW aplicados à manufatura aditiva ainda em certo ponto se limitam quanto a complexidade na geração da trajetória, devido a direção de alimentação, e baixa taxa de deposição, em comparação ao processo GMAW [51].

### **3.2.3 Manufatura aditiva com GMAW – CMT**

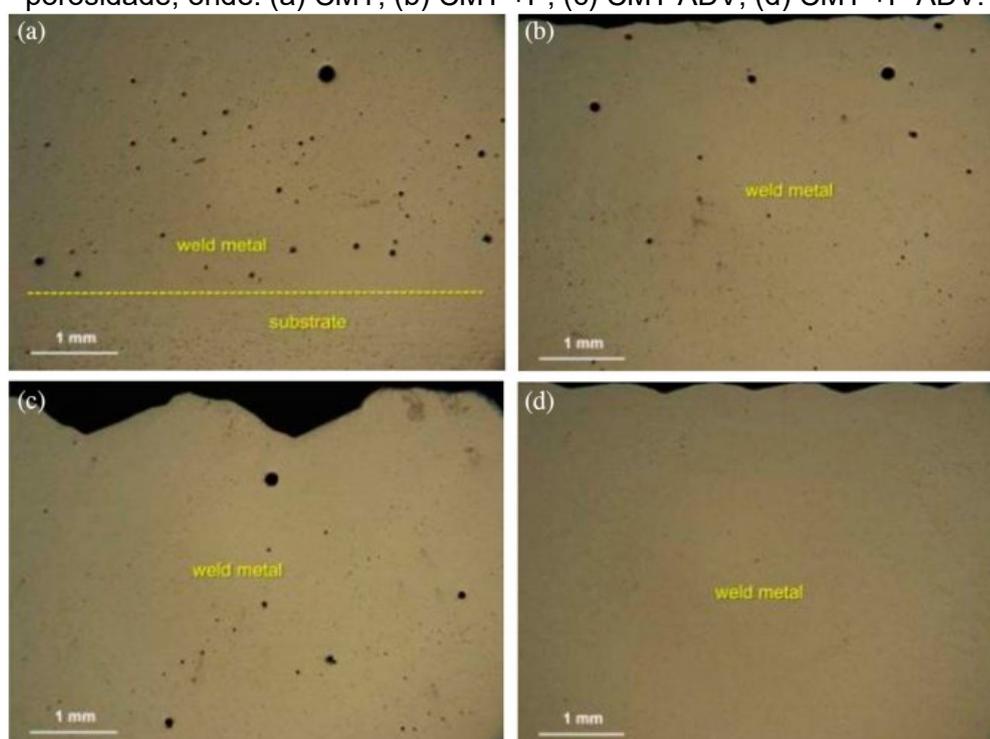
No processo GMAW, diferente dos processos GTAW e PAW, o eletrodo é consumível e alimentado de forma coaxial a partir da tocha de soldagem. Isso simplifica a programação da trajetória da ferramenta para a fabricação de componentes e estruturas complexas. O processo GMAW permitem uma taxa de deposição mais elevada, em comparação com os processos GTAW, PAW e baseados em Laser. Além disso, a aplicação de variantes avançadas do processo GMAW permitem maior controle da geometria dos depósitos, da microestrutura e a redução de defeitos, por meio da manipulação da forma de onda de corrente e perfil de alimentação de arame. Nesse contexto, performando frente ao estado da arte da soldagem GMAW, a variante CMT vem performando entre os processos mais utilizados na manufatura aditiva para vários tipos de materiais. Entre as vantagens desse processo, destaca-se o controle e a repetibilidade da geometria do cordão, além da redução de defeitos de soldagem, aspectos de suma importância na manufatura aditiva.

#### **3.2.3.1 Ligas de alumínio**

Na produção de paredes em alumínio, Cong, et al. [54], compararam os efeitos das diferentes formas de onda da variante CMT na formação de porosidade na liga de alumínio Al-6,3% Cu. As variantes analisadas incluem CMT, CMT Pulse (CMT +P), CMT Advanced (CMT adv) e CMT Pulse Advanced (CMT +P adv). Os experimentos foram conduzidos em depósitos de camada única e depósitos de multicamadas. Verificou-se que a incidência de porosidade no depósito é significativamente influenciada pela versão da variante CMT. O CMT convencional não se mostrou o mais adequado para o processo de manufatura aditiva, uma vez que produziu uma grande quantidade de poros nessa liga, mesmo em depósitos de camada única. O

CMT +P adv se mostrou o processo mais adequado para a deposição de ligas de alumínio, devido ao seu excelente desempenho no controle da porosidade, onde não foram registrados poros acima de 10  $\mu\text{m}$ . Observou-se que os principais fatores que permitem ao processo CMT +P adv controlar a porosidade de maneira eficiente são o baixo aporte térmico, uma estrutura de grão fino equiaxial e uma limpeza eficaz do óxido do arame. A Figura 4 ilustra as macrografias das versões do CMT e seus efeitos na formação de poros.

Figura 4 – Macrografias das diferentes versões do CMT ilustrando a distribuição da porosidade, onde: (a) CMT, (b) CMT +P, (c) CMT ADV, (d) CMT +P ADV.

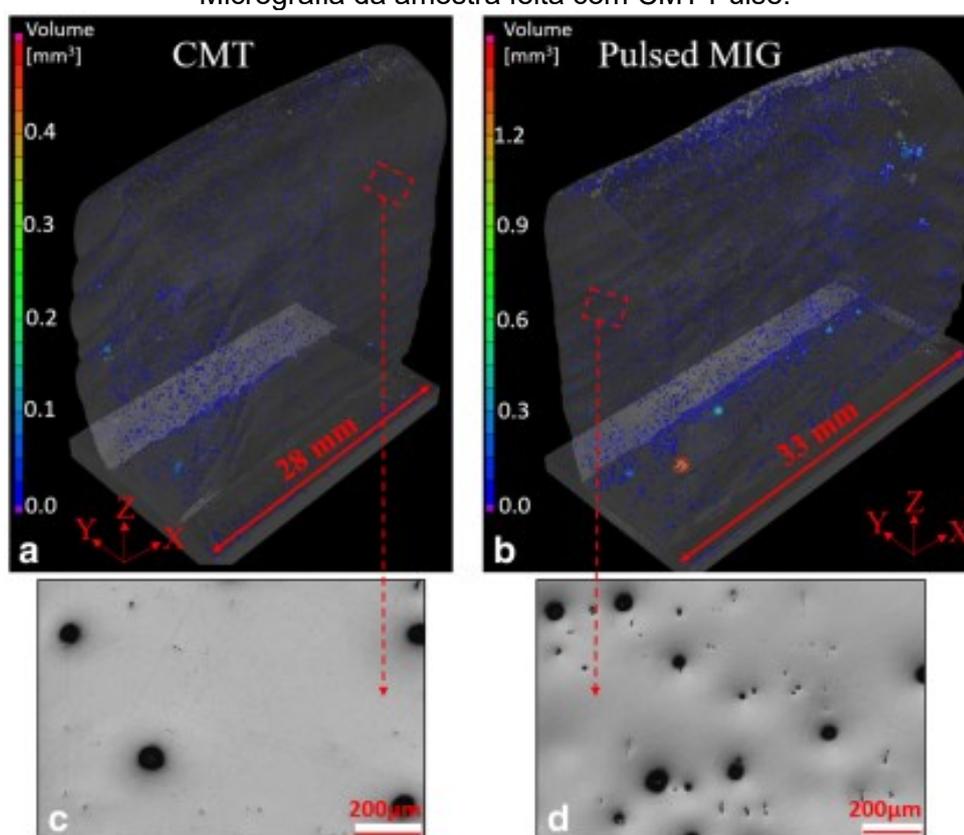


Fonte: Cong, et al. [54].

Analogamente, Derekar, et al. [55], investigaram duas variantes do processo GMAW na fabricação de paredes por manufatura aditiva em uma liga de alumínio 5183, sendo estas o CMT +P e o GMAW Pulsado. Segundo os resultados, as amostras produzidas com a variante GMAW Pulsado apresentaram uma maior absorção de hidrogênio em comparação com as amostras fabricadas com o CMT +P. Além disso, mesmo em diferentes condições de aporte térmico e temperatura entre camadas, as amostras feitas com o pulsado mostraram uma maior incidência de poros e fração de volume de porosidade do que as amostras fabricadas com o CMT +P, como evidenciado na Figura 5, que compara tomografias das peças fabricadas. Além

disso, as amostras produzidas com o CMT exibiram uma quantidade maior de hidrogênio dissolvido em solução sólida em comparação com o pulsado. Observou-se também, para o CMT +P, uma redução no aporte térmico, na temperatura da camada intermediária e no tempo de permanência na camada intermediária, os quais desempenharam um papel fundamental na formação e distribuição de poros nas peças produzidas, corroborando com Cong, et al. [54].

Figura 5 – Tomografia computadorizada via raio-x. a) amostra fabricada com CMT Pulse; b) Amostra fabricada com MIG Pulsado; c) Micrografia da amostra feita com CMT Pulse; d) Micrografia da amostra feita com CMT Pulse.



Fonte: Derekar, et al. [55]

No mesmo contexto, porém focando na otimização de parâmetros, Ortega, et al. [56], investigaram a manipulação do formato de onda da variante CMT para aplicação de MA utilizando a liga de alumínio Al5Si. Em seu estudo os pesquisadores inicialmente mapearam uma faixa operacional de velocidade de alimentação, identificando a influência de cada parâmetro da forma de onda na transferência metálica. Por meio desse mapeamento e utilizando o recurso de “otimização da curva sinérgica” os autores realizaram alterações na intensidade dos pulsos de corrente da forma de onda de corrente CMT, direcionando o processo ao objetivo de construir uma

parede de cordão simples com 100 camadas de altura de forma contínua, ou seja, sem paradas para resfriamento. A parede foi construída com uma precisão de largura avaliada pelo desvio padrão da largura medida em toda a parede de cerca de 0,3 mm. Entretanto, devido ao acúmulo de calor, em função da deposição contínua, um progressivo aumento da velocidade de deslocamento foi necessário para manter a característica geométrica do cordão constante, uma vez que a deposição foi realizada sem paradas para resfriamento. Esse método pode aumentar a produtividade pela redução do tempo de fabricação. No entanto, devido ao acúmulo de calor, pode ocorrer um aumento na tendência de incidência de defeitos, como porosidade e trincas, além de problemas microestruturais do metal depositado, conforme exemplificado por Cong, et al. [54] e Derekar, et al. [55].

### 3.2.3.2 Ligas de aços inoxidáveis

Na produção de peças em aços inoxidáveis, Posch, et al. [9], utilizando aço inoxidável duplex ER2209 e o CMT, fabricaram e analisaram as propriedades mecânicas e metalúrgicas de uma peça fabricada baseada na geometria de uma pá de turbina. A superfície criada possui uma forma semicircular inclinada, conforme ilustrado na Figura 6. Os resultados obtidos indicam que a peça produzida por manufatura aditiva respeita as propriedades mecânicas esperadas para o material, em especial a resistência a tração e dureza. Além disso, em comparação com o processo GMAW convencional, a superfície das peças produzidas com o CMT exibiu uma textura mais suave. Junto disso, destaca-se a influência do CMT na rugosidade da superfície, a qual apresentou, em média, valores de 24,5  $\mu\text{m}$ , comparável às obtidas por processos como fundição em areia, laminação a quente ou corte por chama. Para Posch, et al. [9], uma das vantagens do uso do CMT-WAAM reside na possibilidade de manipulação das propriedades mecânicas em regiões específicas por meio da alteração dos parâmetros de soldagem, como a temperatura de intercamada e o aporte térmico.

Figura 6 – Geometria em forma de pá de aço inoxidável duplex; Direita: Vista lateral; Esquerda: vista frontal.



Fonte: Posch, et al. [9].

Utilizando aço inoxidável 309LSi, Silva, et al. [57], demonstram a influência do tempo de resfriamento sobre a características físicas e metalúrgicas de paredes espessas ( $> 15$  mm) utilizando o CMT e CMT +P. Os experimentos foram conduzidos variando a tempo de resfriamento entre as camadas de 0 a 300 segundos. Verificou-se que o tempo de resfriamento influência diretamente na geometria do depósito, bem como nas características geométricas e metalúrgicas. Esta influência é significativa principalmente em sistemas em malha aberta, portanto o controle dessa variável é essencial. Para Silva, et al. [57], com o controle do tempo de resfriamento foi possível utilizar um processo de alta energia como o CMT Pulse, sem efeitos indesejados como elevada ZAC, bem como zonas de elevadas temperaturas que previnem a formação de fases frágeis. De acordo com os resultados dos testes realizados, foi comprovada a possibilidade de utilização dos dois processos para a manufatura aditiva de paredes espessas. No entanto, os resultados indicaram uma zona de alta temperatura, até 60% menor para o processo CMT, indicando uma menor contribuição da energia necessária para a deposição da mesma taxa de alimentação do material. Essa diferença de energia pode ser explicada pelos ciclos de pulsação em elevada corrente na versão CMT Pulse, neste caso, 8 pulsos para cada ciclo de curto-circuito CMT, gerando maior relação de potência de soldagem por material depositado.

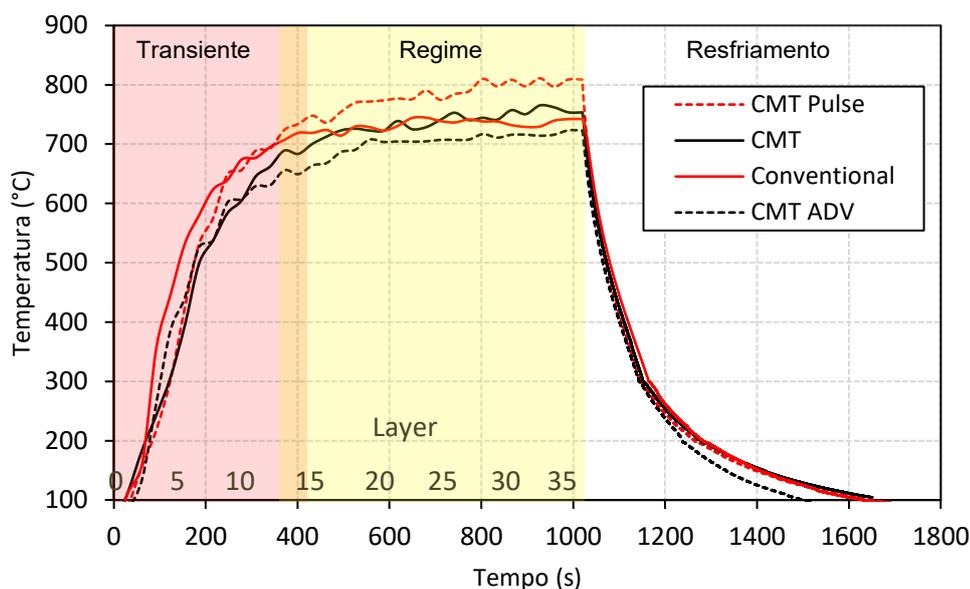
Andrade, et al. [58] apresentam a caracterização de paredes de aço inoxidável austenítico 316LSi fabricados utilizando o CMT. As caracterizações concentraram-se em ensaios mecânicos em diferentes direções e acabamentos de superfície, ensaios

de dureza e análises microestruturais para avaliar a anisotropia nas propriedades do material em escala micro e macro. Adicionalmente, uma análise termográfica da deposição do material foi executada para estabelecer a influência da evolução da temperatura nas propriedades microestruturais e mecânicas das paredes depositadas. Como principal resultado, verificou-se que as amostras usinadas apresentaram melhores propriedades mecânicas do que as amostras como construídas. O acabamento da superfície resultou em um aumento médio de cerca de 32%, 24% e 61% para as orientações 0°, 45° e 90°, na resistência ao escoamento, resistência à tração máxima e tensão de ruptura, respectivamente. Além disso, enquanto as amostras usinadas apresentaram propriedades mecânicas isotrópicas, as amostras como construídas apresentaram anisotropia devido à textura superficial áspera. No mesmo contexto, esses resultados corroboram com os experimentos registrados por Wang, et al. [59] para o mesmo material.

Utilizando aço inoxidável martensítico AISI 420, Galeazzi, et al. [27] realizaram uma análise da influência do GMAW convencional e as versões CMT, CMT Pulse e CMT Advanced sobre as características térmicas e geométricas de paredes produzidas por manufatura aditiva. Verificou-se que todas as versões GMAW apresentaram um bom desempenho na manufatura aditiva. No entanto, houve características específicas de cada versão. No caso do processo convencional observou-se uma boa regularidade geométrica, no entanto maior instabilidade e respingos que nas versões CMT. Além disso, verificou-se um aporte térmico levemente inferior ao CMT. Contudo, essa característica não expressou alterações significativas nas demais variáveis como, por exemplo, temperatura e dureza. No caso da versão CMT Pulse, devido à quantidade de energia imposta à peça, gerou-se valores mais altos de temperatura e, conseqüentemente, uma maior taxa de resfriamento, que refletiu na dureza média da parede. Outra consequência da maior energia foi a menor altura do cordão de solda em comparação com as outras versões, fazendo com que a parede apresentasse uma altura média final inferior as demais, para o mesmo número de cordões depositados. Por outro lado, O CMT Advanced apresentou o menor aporte de calor devido à forma de onda de corrente alterada (CA) aliado a sincronização com a oscilação do arame. A CA tende a melhorar a taxa de fusão do arame, pois a corrente negativa tem uma capacidade de fusão do arame mais alta do que a fase positiva. Em relação às aplicações em WAAM, o CMT

Advanced tende a ser mais eficiente do que as outras versões avaliadas, uma vez que utiliza menos energia e menor corrente eficaz média para obter a mesma taxa média de fusão do arame, mantendo ainda as características do depósito. Para ilustrar o comportamento térmico lido de cada condição se tem o gráfico da Figura 7, que ilustra a temperatura máxima no centro da parede camada ao longo do tempo para cada processo, deixando claro as diferenças entre cada processo.

Figura 7 – Comportamento da temperatura em função do tempo para construção das paredes.



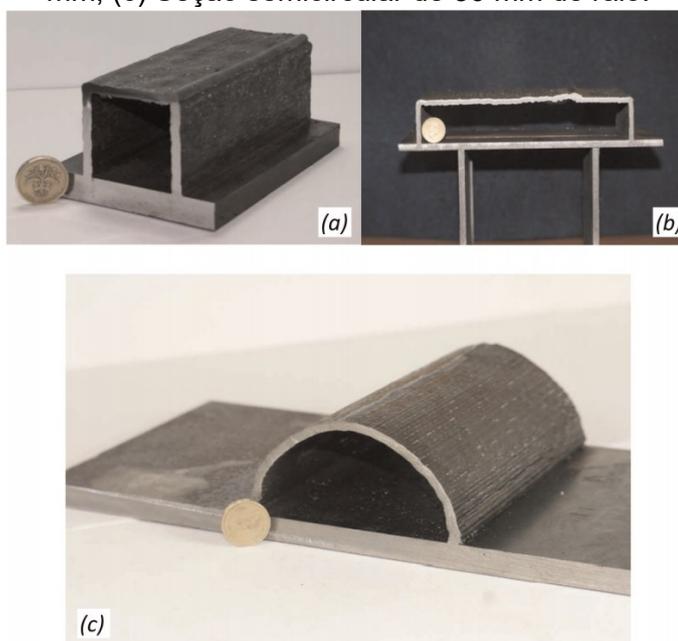
Fonte: Adaptado de Galeazzi, et al. [27].

### 3.2.3.3 Ligas de aços carbono

Utilizando aço carbono, pode-se citar o trabalho de Kazanas, et al. [60] que analisaram a produção de paredes inclinadas utilizando a variante CMT e arame de aço ER70S-6. Convencionalmente, o ângulo da tocha de soldagem é mantido ortogonal ao substrato, isso pode causar problemas de acessibilidade e pode exigir que a peça seja movida durante o processo de deposição. Em seus experimentos, os autores, investigaram de forma sistemática a relação entre velocidade de alimentação e velocidade de deslocamento sobre a qualidade do cordão de solda depositado. Por meio desta relação, foi construída uma base de dados de parâmetros que serviu como referência para realização dos depósitos inclinados. Além disto, seções fechadas também foram exploradas, as quais podem observadas na Figura 8. Os resultados

mostraram a capacidade da variante CMT na construção de peças fora de posição, por meio da construção de paredes entre 0 e 180°.

Figura 8 – Seções fechadas; (a) seção quadrada de 50 mm; (b) seção retangular de 200 mm; (c) Seção semicircular de 50 mm de raio.



Fonte: Kazanas, et al. [60].

Tankova, et al. [61], utilizando aço carbono ER70S-6, realizaram a caracterização mecânica e microestrutural de paredes fabricadas utilizando o CMT. A caracterização mecânica consistiu em analisar os resultados de corpos de provas de tração fabricados em duas condições, nas paredes como construídas e usinadas, extraídos em diferentes direções (0°, 45° e 90°) relativa à trajetória de construção da peça. Os resultados indicaram que, no geral, os corpos de prova usinados apresentaram maior resistência e ductilidade em todos os ensaios. Adicionalmente, a tensão de escoamento e a resistência à tração dos corpos de prova usinados não variaram com a direção, o que não foi o caso dos corpos de prova extraídos das paredes como construídas, o que foi atribuído à variação da rugosidade/textura da superfície e à presença de defeitos na superfície. Em relação a microestrutura, os resultados demonstraram que a parede exibiu três regiões distintas: uma região inferior próxima ao substrato, a qual exibiu uma zona parcialmente transformada, uma zona recristalizada e uma zona de grão grosseiro; a região do meio, que foi a mais predominante em toda a parede, apresentou uma microestrutura com ferrita poligonal e perlita lamelar intergranular; e a região superior, que mostrou uma mistura de

microestruturas de ferrita acicular e bainita. De modo geral, as paredes apresentaram apenas distinções entre como fabricados e usinados. Contudo, ambas as condições apresentaram valores satisfatórios que satisfizeram os requisitos mínimos da norma.

Analogamente, Huang, et al. [62], também utilizando o CMT e aço ER70S-6 aprofundaram o estudo na caracterização mecânica e microestrutural de paredes fabricadas com diferentes estratégias de deposição, por exemplo, inversão da direção de soldagem a cada camada (bidirecional), inversão de trajetória a cada três camadas, fabricação de meia parede, resfriamento total e deposição da segunda metade utilizando, ambas utilizando inversão da direção de soldagem a cada camada, por fim direção de deposição constante (unidirecional). A caracterização mecânica consistiu em analisar os resultados dos ensaios de tração de corpos de prova de tração extraídos utilizando a mesma metodologia de Tankova, et al. [61], ou seja, em duas condições, nas paredes como construídas e usinadas. No entanto, em mais direções, isto é, 0°, 30°, 45°, 60° e 90° e duas espessuras de parede 3 e 8 mm. Os resultados obtidos corroboram com Tankova, et al. [61], indicando que os corpos de prova extraídos como construídos apresentam anisotropia e redução da resistência e ductilidade. Huang et al. [62] atribui esse comportamento à textura da superfície, mas também as baixas taxas de resfriamento reflexo do processo WAAM. Em relação a microestrutura, os resultados demonstraram isotropia e fases semelhantes as identificadas por Tankova, et al. [61].

Outros estudos também abordaram de forma sistemática as propriedades mecânicas e metalúrgicas do aço ER70S-6 utilizando o processo CMT para a fabricação de paredes. Dentre esses estudos, pode-se citar as pesquisas de Ermakova, et al. [63], Nagasai, et al. [64] e Silvestru, et al. [65], cujos resultados experimentais foram consistentes com os obtidos por Tankova et al. [61] e Huang, et al. [62], em termos de características mecânicas e metalúrgicas. Isso reforça o aspecto crucial da aplicação do CMT, que é o controle preciso da transferência metálica, conferindo estabilidade e regularidade aos depósitos.

### 3.2.3.4 Ligas especiais de fabricação

Utilizando aço de alta resistência e baixa liga na produção de peças, Yildiz et al. [66] propuseram uma análise mecânica e metalúrgica de paredes com cordão simples e multicordões utilizando o arame de aço ER120S-G e a variante CMT. Os autores, da mesma forma que Kazanas et al. [60], utilizaram como principal parâmetro de controle de aporte térmico a razão entre velocidade de deslocamento e velocidade de alimentação. Em seus experimentos, Yildiz et al. [66] definiram de forma experimental as faixas de aporte térmico para construção das paredes, onde na parede com cordão simples e de baixo aporte térmico foi utilizado 339 J/mm. Na parede com cordão simples de alto aporte térmico foi utilizado 559 J/mm e na parede multicordões oscilando de 22 mm de largura foi utilizado 361 J/mm. As amostras foram caracterizadas por meio de ensaios de tração, realizados em duas direções defasadas em 90°, para verificar a existência de anisotropia. Os resultados indicaram que a resistência à tração e a tensão de escoamento para as paredes com cordões simples não variaram significativamente em função da direção. Por outro lado, os valores de alongamento total e uniforme exibem uma diferença de até 10%, indicando uma anisotropia nos valores de alongamento. As paredes com múltiplos cordões, produzidas por meio da estratégia de deposição por oscilação, apresentaram menor tensão de escoamento e maior ductilidade em comparação com paredes de um único cordão. Adicionalmente, verificou-se nos resultados valores de tensão de escoamento 38% menores do que o valor de referência do material do arame de solda. Esse efeito pode ser atribuído aos ciclos térmicos repetitivos aos quais as peças foram expostas durante a fabricação, os quais geram alterações sensíveis na microestrutura.

Ali, et al. [2] analisaram a influência do aporte térmico nas propriedades mecânicas resultantes e na microestrutura de um aço ferramenta. As investigações foram realizadas com o aço ferramenta para trabalho a quente AISI H11 ou 1.2343 (37CrMoV 5-1), utilizado na fabricação de moldes para injeção de polímeros, matrizes de extrusão a quente e matrizes de forjamento. Os resultados mostram que este aço pode ser utilizado para gerar componentes ou estruturas de metal com alta reprodutibilidade, geometria em forma de rede, ausência de trincas e uma taxa de deposição de até 3,6 kg/h. Isso corrobora com os dados de Williams, et al. [4] e Ding, et al. [3] e justifica o uso de processos com altas taxas de deposição para construção

destes componentes quando comparados a processos baseados em TIG, Plasma e Laser, que mesmo apresentando relativa melhor qualidade superficial apresentam taxas de deposição muito menores.

Utilizando o CMT para manufatura de titânio (Ti-6Al-4V), Taberner, et al. [51] demonstraram a influência de diferentes concentrações de hélio na mistura gasosa sobre a taxa de deposição e propriedades mecânicas. Os resultados indicaram que o aumento da concentração de hélio para valores superiores a 50% começou a manifestar mudanças nas propriedades mecânicas, como um aumento na tensão máxima e na tensão de escoamento. Por outro lado, observou-se que o alongamento tendeu a diminuir com o aumento das concentrações de hélio. Além disso, notou-se uma redução na anisotropia em função das concentrações de hélio, resultando em propriedades mais homogêneas na parede. Os autores também ressaltaram que, devido à propensão do processo CMT em gerar baixos aportes térmicos, é necessário adotar estratégias para aumentar a potência, visando melhorar os aspectos dos cordões e torná-los adequados para a manufatura aditiva. Neste caso, a utilização de hélio na mistura foi responsável pelas adaptações nos cordões e pelo aumento da taxa de deposição.

No mesmo contexto, também utilizando titânio Gierth, et al. [67] concentraram-se no desenvolvimento de estratégias de construção e na análise do impacto de diferentes temperaturas interpasse nas propriedades geométricas, metalúrgicas e mecânicas resultantes. Os principais resultados obtidos demonstraram que a temperatura de regime tendeu a aumentar com o aumento da temperatura interpasse. Por outro lado, foi demonstrado que a temperatura interpasse tem uma influência mínima na resistência à tração, na energia de impacto e na dureza. Isso legitima o aumento da temperatura entre passes para reduzir o tempo de construção necessário. Os autores também destacam que as especificações do fabricante do arame quanto à resistência à tração mínima de 895 MPa foram excedidas independentemente da temperatura entre passes ou da largura da estrutura. Isso resulta em um aumento da eficiência para a fabricação de componentes feitos de Ti-6Al-4V utilizando o CMT.

Yangfan, et al. [68] também utilizando o CMT analisaram influência da velocidade soldagem na microestrutura e nas propriedades mecânicas de paredes fabricadas a partir da liga de Inconel 625. Os resultados referentes aos estudos da microestrutura revelaram variação na microestrutura em diferentes camadas da

amostra, com a camada inferior consistindo em grãos celulares primários finos. As propriedades mecânicas, que incluem dureza e propriedades de tração, mostraram que com o aumento da velocidade de deslocamento, a microdureza média das amostras aumentou ligeiramente de 248 HV para 253 HV. A resistência à tração máxima aumentou de 647 MPa para 687 MPa, enquanto a resistência de escoamento aumentou de 376 MPa para 400 MPa. Os resultados mostraram que o desempenho mecânico dos componentes fabricados utilizando CMT foi melhor do que as propriedades mecânicas das peças fundidas de liga Inconel 625, exceto a resistência à tração, demonstrando que as ligas Inconel 625 podem ser fabricadas utilizando WAAM com o CMT.

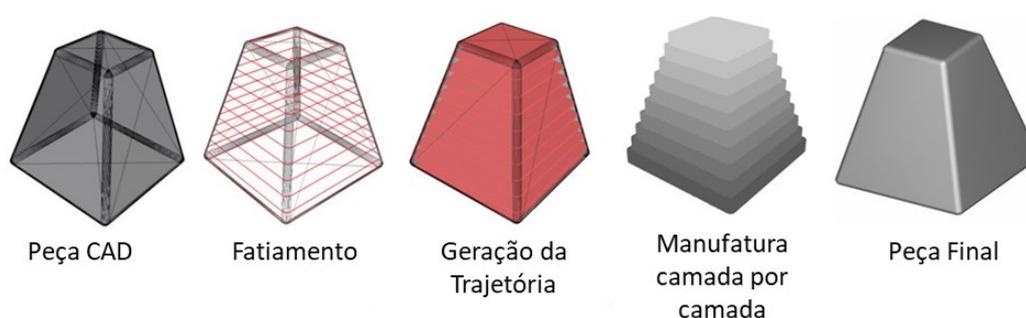
#### 3.2.3.5 Síntese do capítulo

Em síntese, com base nesta análise, o CMT e suas variantes mostram-se como a melhor solução atualmente para aplicações em WAAM em comparação com o processo convencional e outros métodos. Isso se deve ao fato de conferirem maior versatilidade na soldagem e fabricação aditiva de diversos tipos de materiais, tanto em condições de parede fina quanto de parede espessa, com alta controlabilidade e estabilidade da transferência metálica e da geometria do depósito. Além disso, devido ao seu modo de transferência metálica dinâmico, pode proporcionar propriedades microestruturais e mecânicas superiores às observadas no processo convencional.

### 3.2.4 Estratégias de geração de trajetória e controle

A manufatura aditiva, segundo a norma ISO/ASTM 52900-21 [69] é definida como a fabricação de objetos e estruturas pela adição controlada de material, camada a camada, baseando-se em um modelo 3D (CAD) prévio. Esse processo pode ser dividido em modelagem 3D, fatiamento, criação da trajetória e parametrização dos parâmetros de adição, manufatura camada a camada e peça final, acabada (net-shape) ou semiacabada (near net-shape), conforme mostra a Figura 9.

Figura 9 – Esquema básico do processo de manufatura aditiva.



Fonte: Autor.

No entanto, no WAAM, um dos grandes desafios está na geração da trajetória e na programação do processo, pois é crucial que se obtenha a geometria planejada ou prevista pelo software de fatiamento e esse é um desafio para o processo GMAW, ou seja, sincronizar o comportamento real do processo, como altura e largura do cordão ou camada, com o programado. Esses parâmetros têm impacto direto na relação entre o CAD e a peça final, influenciando sua morfologia, especialmente no que diz respeito à geração de defeitos geométricos e metalúrgicos.

#### 3.2.4.1 Estratégias de sobreposição vertical e horizontal

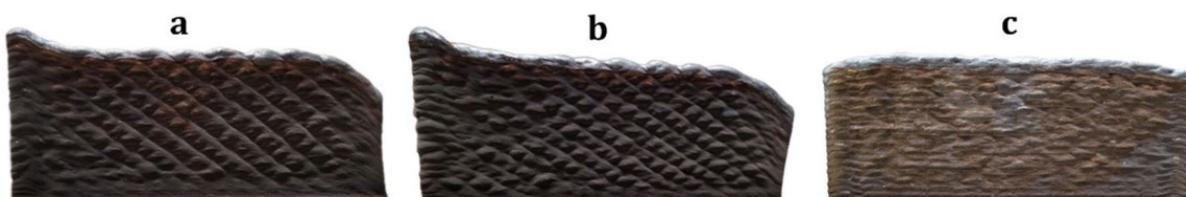
Embora existam diversos softwares de CAM para manufatura aditiva, para o WAAM ainda existe uma lacuna a ser preenchida, ou seja, o entendimento dos efeitos da trajetória sobre a fabricação das peças. Dehaghani, et al. [70] analisaram o efeito que a trajetória unidirecional e bidirecional pode exercer sobre a geometria final de paredes fabricadas com de cordão simples. Apesar de utilizar o CMT, um processo de alta eficiência e controlabilidade, os experimentos com trajetória unidirecional resultaram em um defeito crítico na geometria da parede. Isso se manifestou como

um achatamento no final da camada e um acúmulo de material no início. Tais defeitos não foram observados na parede fabricada com trajetória bidirecional.

O efeito descrito para a trajetória unidirecional pode ser atribuído à distribuição de calor durante o processo. No início do cordão, a peça está relativamente fria. A abertura do arco, a formação da poça e a transferência de material ocorrem com baixa energia, já que parte da energia térmica é utilizada para aquecer a chapa e formar a poça inicialmente. Isso leva à formação de um segmento de cordão com menor molhabilidade, ou seja, com maior convexidade. Por outro lado, no final do cordão, o sistema está mais aquecido e em regime estável. Quando a fonte inicia o fechamento do arco e interrompe a alimentação de material, a poça de fusão começa a solidificar. Devido à taxa de resfriamento, a poça tende a contrair, resultando em uma concavidade no trecho final do cordão. Não obstante, para a trajetória bidirecional, ocorre uma compensação ou correção dos efeitos, uma vez que o início do cordão complementa a concavidade do final com a convexidade.

Esse comportamento em um cordão de solda simples pode não gerar problemas, mas na manufatura aditiva, esse comportamento se extrapolado para 'n' camadas se acumula e gera desvios importantes na geometria da peça. Para mitigar esse efeito, a maioria dos trabalhos revisados ao longo desta tese demonstraram que, independentemente de a parede ser simples (Parede fina) ou multicordões (espessa) a trajetória bidirecional apresenta os melhores resultados geométricos. A Figura 10, apresenta alguns resultados de Dehaghani, et al. [70] que demonstram a diferença no aspecto geométrico de paredes produzidas com trajetória unidirecional e bidirecional.

Figura 10 – Vista Lateral das paredes fabricadas com trajetória unidirecional e bidirecional. Onde: a) e b) Unidirecional (Deposição da esquerda para direita); c) Bidirecional.



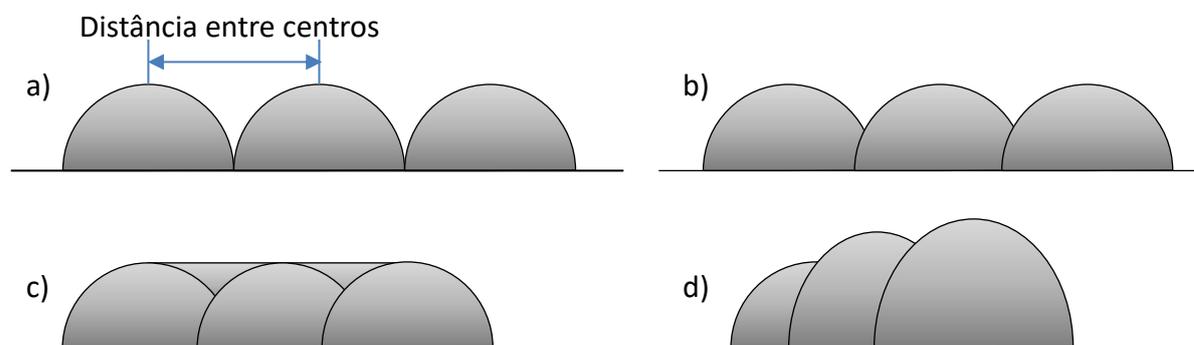
Fonte: Dehaghani, et al. [70].

Além do modelo de trajetória de deposição, o incremento da camada é outra característica importante, já que sua variação pode influenciar diretamente as características geométricas e a estabilidade do processo de soldagem. Esta variável pode ser determinada empiricamente ou ajustada por meio de sensores. Alguns

estudos demonstram métodos para determinar o incremento da camada usando a altura média da camada ao longo de  $n$  sobreposições verticais ou com base em uma relação entre altura e penetração [3, 6, 15, 60, 70].

Por outro lado, além das peças de construídas a partir do empilhamento de cordões simples tem-se peças de parede espessa que são compostas por sobreposições horizontais e verticais. A problemática da sobreposição horizontal de cordões reside no correto planejamento da distância de sobreposição, para evitar defeitos como, por exemplo, sobreposição incompleta ou sobreposição excessiva, que podem ser visualizados no esquema de Ding, et al. [3] na Figura 11.

Figura 11 – Esquema de diferentes padrões de sobreposição e suas implicações, onde:  
a) Falta de sobreposição; b) Sobreposição insuficiente; c) Sobreposição adequada; d) excesso de sobreposição.



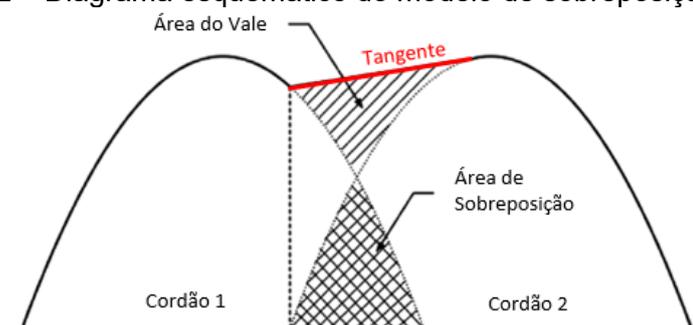
Fonte: Adaptado de Ding, et al. [3].

O estudo do planejamento da trajetória deve estar em consonância com o do processo de soldagem. Neste sentido, o entendimento dos mecanismos de formação e variação da geometria do depósito é de suma importância no planejamento e construção de uma trajetória na fabricação de peças por WAAM. Para isso, alguns métodos podem ser empregados, como mapeamento e análise de tendência do perfil geométrico dos depósitos em função dos parâmetros de soldagem, assim como a modelagem matemática do perfil geométrico dos depósitos.

Nessa lógica, a modelagem matemática se mostra como uma alternativa para a definição de condições ótimas de sobreposição, Ding, et al. [14] apresentam métodos de ajuste de curva baseados na largura e altura dos cordões depositados. Os resultados experimentais mostram que as funções de parábola e cosseno representam com precisão o perfil da seção transversal de um cordão de solda. Além

disto, para a sobreposição horizontal, os autores levando em conta o comportando observado experimentalmente, verificaram um efeito de tangencia da crista do cordão de sobreposição ao longo do cordão base e uma relação entre as áreas de sobreposição, onde a distância entre os centros dos cordões deve ter uma distância que corresponda a uma condição em que a área de sobreposição seja igual ou muito próxima a área do vale (crista do cordão). A Figura 12 ilustra graficamente o método descrito.

Figura 12 – Diagrama esquemático do modelo de sobreposição tangente



Fonte: adaptado de Ding, et al. [14]

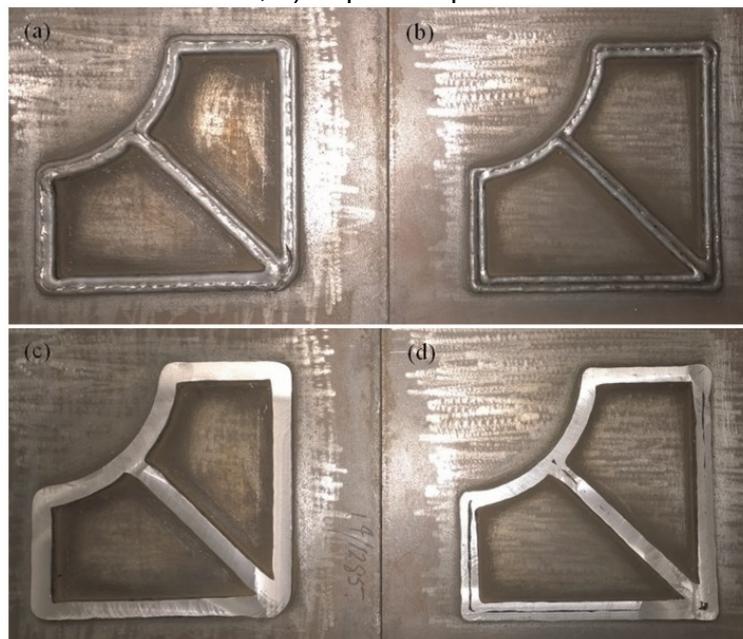
Ding, et al. [14] concluíram que o uso do método considerando uma representação baseado em funções de segundo grau junto do comportamento tangencial, representa de forma acurada o perfil geométrico típico e o distanciamento ideal entre os cordões. No entanto, se aplicado o mesmo método, porém sem utilização da tangente, o erro é suficientemente pequeno e pode ser desprezado. Nesse sentido, qualquer valor entre 67% e 73% da largura do cordão de base para a distância entre centros já é suficiente para uma sobreposição adequada, desde que o cordão apresente molhabilidade maior que  $90^\circ$  e as condições geométricas do cordão depositado sejam mantidas as mesmas ao longo da seção longitudinal.

Analogamente, Suryakumara, et al. [71] e Xiong, et al. [72] também apresentam a modelagem da sobreposição horizontal de múltiplos cordões, baseando-se em funções de segundo grau (parábolas) e funções cosseno, onde os resultados de melhor performance foram os com a função de segundo grau corroborando com Ding, et al. [14]. Entretanto, diferentemente de Ding, et al. [14], os autores concentram-se em manter a área igual entre a sobreposição e o vale, sem considera a inclinação do cordão de sobreposição. Os resultados práticos tanto de Suryakumara, et al. [71] como de Xiong, et al. [72] apresentaram um perfil de

sobreposição adequado em distâncias entre centros menos conservadoras, entre 65% e 70% da largura do cordão base.

Em continuidade, Ding, et al. [6] apresentaram a concatenação do método de otimização de trajetória aliado ao método de sobreposição tangencial, ou seja, distâncias entre centros de 67% a 73% da largura do cordão. Nesse estudo, visando redução de sobremetal, bem como de trajetos desnecessários, aliado à mínima sobreposição, foi analisado a deposição de paredes finas, sobrepondo horizontalmente dois cordões. Para comparação, foi utilizado um método convencional de criação de trajetória, pois se mostra bastante eficiente para padrões de contorno simples (cordão simples). Esse método cria padrões de contorno de fora para dentro, levando em conta o perímetro. No entanto, na construção de trajetórias compostas (com sobreposição), o método acaba compensando as curvas de limite recursivamente em direção ao seu interior, não respeitando o distanciamento entre os trajetos, deixando assim, lacunas internas que podem gerar problemas de falta de preenchimento. Os resultados mostraram uma diferença significativa entre as amostras, onde é possível verificar na Figura 13c um preenchimento completo em relação a outro método na Figura 13d que apresentou sobreposição incompleta entre as sobreposições. Entretanto, o método convencional poderia ter sido corrigido se o processo de soldagem utilizado tivesse utilizado uma taxa de deposição maior ou velocidade de deslocamento menor, para aumentar a largura do depósito. Neste sentido, pode-se reafirmar que o método de criação de trajetória deve estar em consonância com o processo de soldagem.

Figura 13 – Comparação experimental entre os métodos descritos, onde: a) Deposição utilizando método otimizado; b) Deposição utilizando método convencional; c) Superfície pós-usinada do método otimizado; d) Superfície pós-usinada do método convencional.



Fonte: Ding, et al. [6].

Analogamente, Li, et al. [73] desenvolveram um modelo matemático de sobreposição horizontal levando em conta o espalhamento dos cordões, o qual, segundo os autores, tende a deslocar o centroide do cordão sobreposto devido a atuação da dinâmica de ancoramento e solidificação da poça de fusão durante a deposição próximo ou sobre outro cordão. O método empregado consistiu em corrigir empiricamente um modelo já existente adicionando essa condição de espalhamento. Os resultados obtidos por Li, et al. [73] corroboram com os resultados mostrados por Ding, et al. [14], Suryakumara, et al. [71] e Xiong, et al. [72], onde também foi verificado que valores de sobreposição entre 65% e 73% da largura do cordão base são suficientes para uma sobreposição com baixa incidência de defeitos. Os dados gerados nos experimentos serviram como base de dados para o treinamento de uma rede neural artificial. Na prática, utilizando o modelo proposto, verificou-se uma redução de problemas de sobreposição incompleta, bem como leve atenuação no perfil superficial das sobreposições, conforme ilustra a Figura 21.

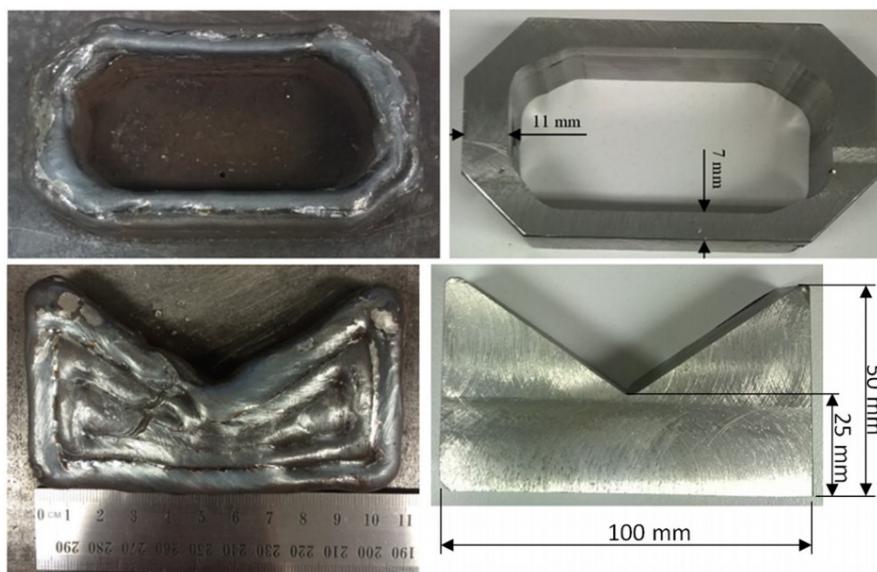
Figura 14 – Seção transversal dos corpos de prova manufacturados utilizando um modelo sem considerar o espalhamento e considerando o espalhamento.



Fonte: Adaptado de Li, et al. [73].

Observou-se até aqui que o processo de planejamento e criação de uma trajetória concatenada ao processo de soldagem não é trivial, devido a infinidade de possibilidades de relações e interações entre parâmetros de soldagem e trajetetos. Outra solução para o tratamento desse volume de possibilidades é o uso de inteligência artificial, que a partir de iterações previamente treinadas converge para uma solução otimizada, dentro dos limites de inferência programados. Este conceito não se restringe a um modo específico de trajetória, bem como de parâmetros de soldagem e sua complexidade vai depender da quantidade de dados utilizados para o treinamento do sistema. Neste sentido, Ding, et al. [7] desenvolveram um estudo focado no desenvolvimento de um sistema WAAM autônomo para análise do modelo CAD, definição da trajetória de deposição, bem como dos parâmetros de soldagem, por meio de uma rede neural artificial do tipo *feed forward backpropagation*, atuando de maneira indireta de forma adaptativa. Os resultados práticos mostraram que o sistema foi capaz de gerar peças de qualidade sem problemas de sobreposição incompleta, bem como geometricamente acurados, de acordo com o modelo inicialmente proposto. A Figura 20 ilustra exemplos de peças na sua condições *near-net shape* e pós-usinadas, manufacturadas utilizando este modelo.

Figura 15 – Exemplos de validações do sistema, peças na condições near-net shape e pós usinadas.

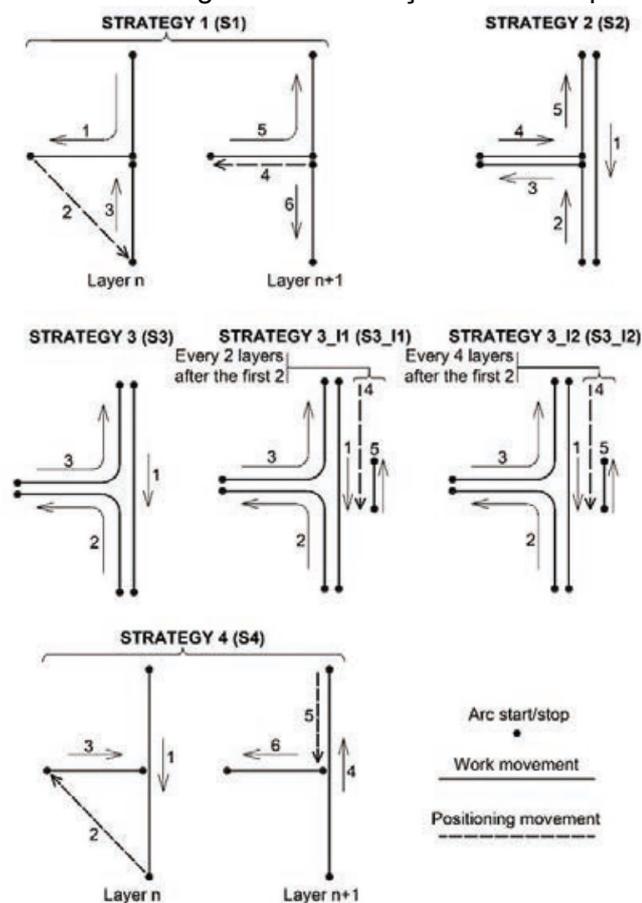


Fonte: Adaptado de Ding, et al. [7].

#### 3.2.4.2 Intersecção de paredes

A intersecção entre os cordões depositados, a qual é uma condição bastante comum na fabricação de peças multifacetadas ou em elementos entrelaçados, é outro ponto de relevância na manufatura aditiva por deposição a arco. O desafio da intersecção de cordões é manter a regularidade da camada nos pontos de cruzamento, para não haver acúmulo ou falta de material, bem como uma coesão adequada dos trechos entrelaçados. Nesse contexto, pode-se citar Venturini, et al. [74], que avaliaram diferentes estratégias de intersecção com o objetivo de identificar um modelo otimizado. Os métodos de intersecção utilizados podem ser visualizados no esquema apresentado na Figura 16.

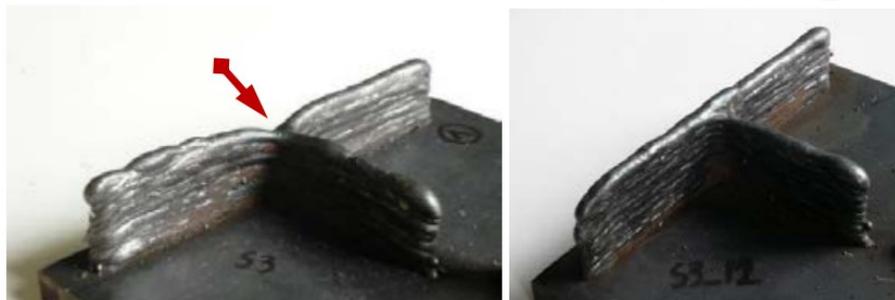
Figura 16 – Esquema das estratégias de intersecção adotadas por Venturini, et al [74]



Fonte: Venturini, et al. [74].

Os resultados obtidos indicaram um desempenho aceitável para todas as estratégias, exceto para a S3, que apresentou um defeito crítico na região de intersecção, conforme mostra a Figura 17 (esquerda). As demais estratégias apresentaram desempenho similar, com destaque a estratégia S3\_I2 pela boa relação entre acessibilidade para pós usinagem, eficiência de deposição e tempo de deposição, conforme ilustra a Figura 17 (Direita).

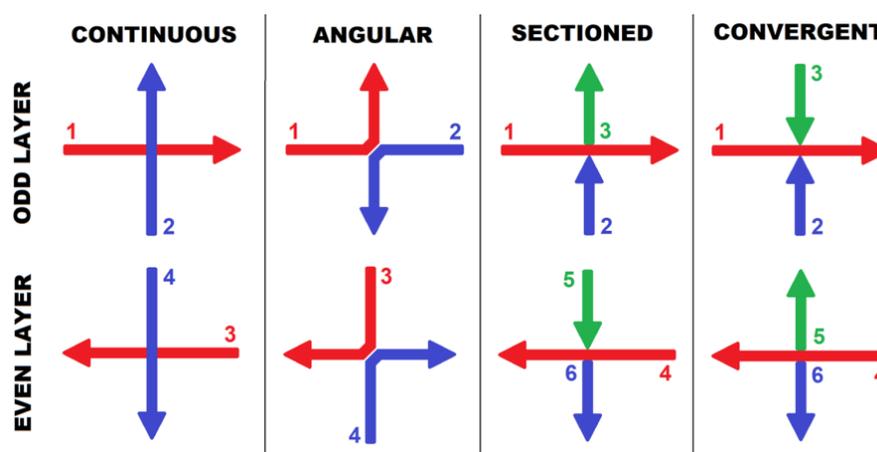
Figura 17 – Resultados das sobreposições para S3 (Esquerda) e S3\_I2 (Direita).



Fonte: Venturini, et al. [74].

Sousa, et al. [75], deram continuidade a esse estudo ao ampliá-lo para uma análise mais aprofundada do efeito de diferentes estratégias de intersecção em 90° para cordões simples, utilizando o arame de aço de baixa liga AWS ER80S-G, conforme ilustrado no esquema da Figura 18. Os autores investigaram os efeitos das diversas estratégias na resposta térmica, bem como sua influência na microestrutura e na dureza do material, comparando a região de intersecção com o restante da parede.

Figura 18 – Esquema das estratégias de intersecção adotadas por Sousa, et al [75]



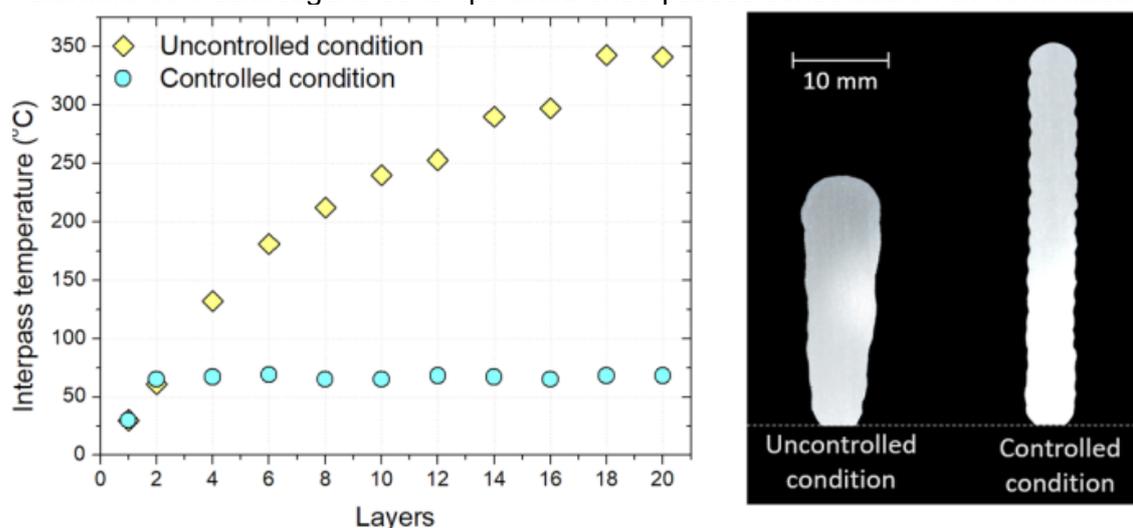
Fonte: Sousa, et al. [75].

Os resultados obtidos indicaram uma variação para todo o conjunto amostral na região de intersecção causada pela variação do stick-out, uma vez que a altura da tocha em relação a peça foi mantida constante. Adicionalmente, verificou-se uma taxa de resfriamento menor na região de intersecção para todos os casos. No entanto, essa diferença em relação ao restante da peça não foi significativa para afetar alguma propriedade microestrutural ou mecânica. Os autores não determinaram qual das condições de intersecção foi mais eficiente, mas enfatizaram a importância de controlar a variação da altura da tocha ao longo da deposição para mitigar as variações nos parâmetros de soldagem e as consequentes alterações no perfil de deposição.

### 3.2.4.3 Estratégias de controle

Para um planejamento assertivo das trajetórias de deposição, tanto o incremento vertical ou altura da camada quanto o incremento horizontal ou sobreposição devem ser conhecidos. Portanto, para o processo GMAW, que os resultados são afetados por fatores diversos, torna-se essencial ter um entendimento da dinâmica de funcionamento do processo utilizado e dos resultados que podem ser gerados sob diferentes condições operacionais, aumentando assim a chance de fazer uma programação de forma adequada. Para auxiliar no controle e na manutenção das trajetórias durante o processamento, sensores podem ser empregados. Silva et al. [76] empregaram um sensor de temperatura (pirômetro) para monitorar e controlar a temperatura interpasse ou entre camadas durante a fabricação de paredes finas em alumínio. Por meio desse controle, foi possível manter a geometria do cordão de solda consistente ao longo de toda a deposição, independentemente da variação de temperatura. A Figura 19 ilustra os resultados obtidos com e sem o controle da temperatura entre camadas. Observa-se que, na condição sem controle, a parede exibe uma variação excessiva na largura e, apesar de possuir o mesmo número de camadas, apresenta uma altura significativamente inferior à parede com controle.

Figura 19 – Temperatura média entre passes e perfil geométrico das paredes em liga de alumínio com abordagens de temperatura entre passes controlada e não controlada.



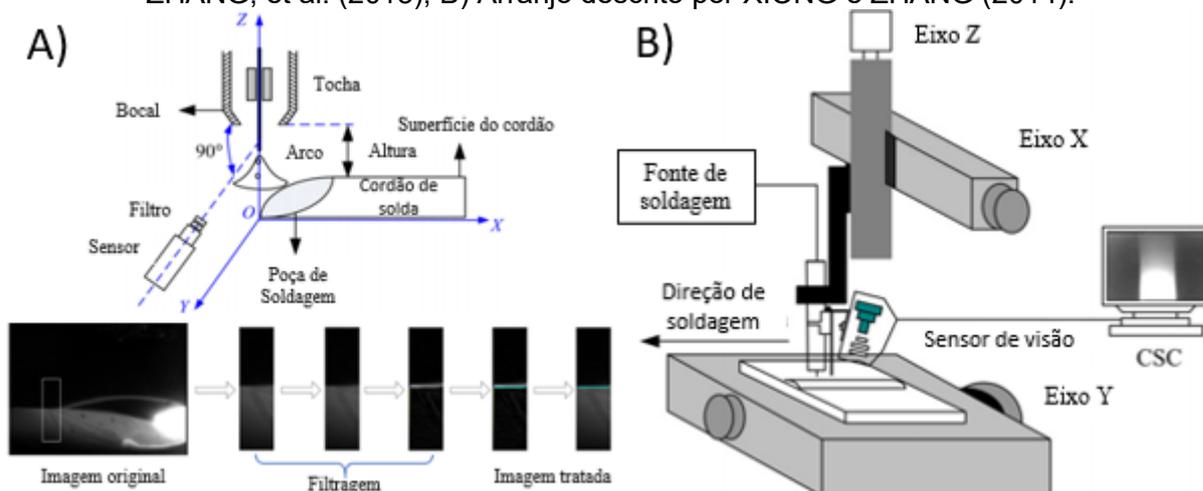
Fonte: Silva, et al. [76].

Além do controle da temperatura entre camadas outras formas de controle podem ser utilizadas, tanto em sozinhas quanto combinadas. Na soldagem em geral a visão computacional é aplicada de modo a corrigir e manter trajetórias de deposição de união de peças. Para isso, conforme cita Rout, et al. [77], sensores de visão do tipo laser (STL) são comumente aplicados para essas operações de rastreamento de junta, devido a sua capacidade de funcionamento em tempo real sem interferência significativa do arco elétrico sobre o mensurando.

Na manufatura aditiva, Xiong, et al.[78] e Xiong e Zhang [79] apresentaram a utilização de um STL para correção da altura da tocha entre camadas na deposição de paredes cordão simples. O método de controle utilizado baseou-se na análise direta do perfil da poça metálica, onde em função da variação de algumas características geométricas da poça um algoritmo acionava variações controladas sobre a trajetória do manipulador, bem como sobre os parâmetros de soldagem. O algoritmo utilizado se concentrou em manter uma altura relativa variando a taxa de deposição, reduzindo a necessidade de paradas para resfriamento, além do controle incremental da altura da tocha e de possíveis ondulações ou defeitos geométricos tênues que poderiam eventualmente aparecer.

Contudo, estes protótipos se limitam a formas geométricas simples como, por exemplo, paredes. Isso ocorre devido ao arranjo físico adotado, o qual é apresentado na Figura 20. Para deposição de geometrias relativamente complexas como, por exemplo, polígonos ou círculos, rotações no conjunto tocha e sensor Laser devem ser considerados, de modo a manter o laser sobre o mensurando. Neste sentido, sistemas baseados em manipuladores cartesianos devem no mínimo incorporar um eixo extra ou considerar a utilização de manipuladores antropomórficos, que mesmo assim possuem certa dificuldade em realizar movimentações em curvas fechadas ou agudas. Além disto, a trajetória deve ser planejada e construída de tal modo que atenda esse requisito.

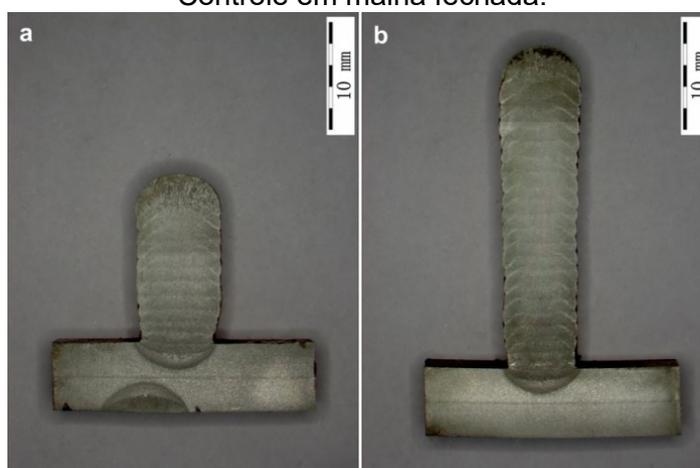
Figura 20 – Arranjos físicos utilizados nos protótipos, onde A) Arranjo descrito por XIONG, ZHANG, et al. (2013); B) Arranjo descrito por XIONG e ZHANG (2014).



Fonte: adaptado de Xiong et al. [78] e Xiong e Zhang [79].

Os resultados de Xiong, et al., [78], demonstraram uma melhoria efetiva no perfil geométrico da parede depositada ao utilizar o sistema em malha fechada com sensoriamento a laser. A Figura 21 apresenta as seções transversais de duas paredes construídas: uma em malha aberta e outra em malha fechada. Na Figura 21a, é mostrado o resultado de uma deposição em malha aberta, com 11 camadas de deposição, devido à variação da altura do arco que causou instabilidade no processo, impossibilitando a continuidade da deposição. Na Figura 21b, com controle em malha fechada, todas as camadas programadas foram depositadas com estabilidade e precisão entre as sobreposições verticais.

Figura 21 – Seção transversal de paredes cordão simples. a) Controle em malha aberta; b) Controle em malha fechada.



Fonte: Xiong, et al. [78].

Para realizar correções em tempo real em peças relativamente complexas, é necessário um planejamento complexo e específico para manter o sensor ativo, o que em alguns casos pode ser inviável. Portanto, o uso desse tipo de sensor para correção offline também é uma opção interessante. Isso significa que, a cada camada ou em outro fator determinado para verificação, o manipulador junto com o sensor percorre a peça em construção e faz correções com base no modelo CAD ou na trajetória desejada. Esse tipo de controle pode ser observado em alguns sistemas comerciais desenvolvidos pelas empresas LIBURDI e GEFERTEC, que atuam na área de manufatura aditiva. Além dos sensores de visão, baseados em laser ou análise de imagem, os sensores que utilizam variáveis elétricas, conhecidos como sensores a arco, também podem ser uma opção interessante para correções em tempo real.

#### 3.2.4.4 Síntese do capítulo

Em síntese, com base nesta análise sobre as estratégias de deposição, torna-se evidente que compreender e reconhecer a influência do processo de soldagem sobre o perfil geométrico em diferentes condições é crucial para um planejamento de trajetória mais preciso. Isso permite operações dentro de faixas que respeitem as condições inicialmente parametrizadas de incremento vertical e sobreposição, possibilitando assertividade na relação entre o modelo desejado, a trajetória e a peça fabricada. Além disso, estratégias de monitoramento e controle são fundamentais para manter o processo em condições estáveis, sem variações que possam comprometer a qualidade da peça final.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

Nest capítulo, serão apresentados os materiais empregados, como sistemas de aquisição, monitoramento e equipamentos de soldagem, bem como os métodos utilizados para coleta de dados, análises e validações dos resultados obtidos.

### 4.1 ORGANIZAÇÃO METODOLOGIA DO TRABALHO

A manufatura aditiva por deposição é uma técnica de fabricação aditiva que busca, por meio de um modelo CAD, planejamento, parametrização e deposição, obter uma peça em estado acabado ou semiacabado, de acordo com os requisitos dimensionais e a aplicação. Cada fase da técnica de manufatura aditiva apresenta um nível específico de relevância sobre peça final. Dentre as etapas apresentadas o planejamento da trajetória e parametrização do processo de soldagem em consonância são de alta criticidade e determinantes na fabricação de peças, pois são características decisivas para manutenibilidade da relação CAD-to-part — ou seja, a fidelidade entre o modelo CAD e a peça final, que atualmente é um dos maiores desafios da manufatura aditiva.

Este trabalho se concentrou em analisar e desenvolver experimentos para solucionar a problemática da relação CAD-to-part. Para isto, foi elaborado um mapeamento do processo de deposição frente a diferentes condições operacionais e a partir disto um banco de dados que correlaciona aspectos geométricos do cordão depositado, parâmetros elétricos da variante CMT do processo GMAW e a trajetória de deposição foi criado. Além disso, diretrizes operacionais para conexão, interseção e modelo de trajetória foram elaboradas.

Por fim, com a compilação dessas diretrizes em uma máquina de inferência, foi desenvolvido um algoritmo de predição de parâmetros, capaz de avaliar o modelo CAD, segmentar a peça conforme a espessura da parede e parametrizar cada segmento de forma adaptativa, orientada para a geometria final com ou sem sobre-metal. A Figura 22 ilustra esquematicamente o processo de manufatura aditiva por deposição a arco, com foco no planejamento e parametrização da trajetória e do processo de deposição, visando a melhor relação CAD-to-part.

Figura 22 – Fluxograma do processo de manufatura aditiva por deposição a arco e linhas de pesquisa exploradas no presente trabalho.



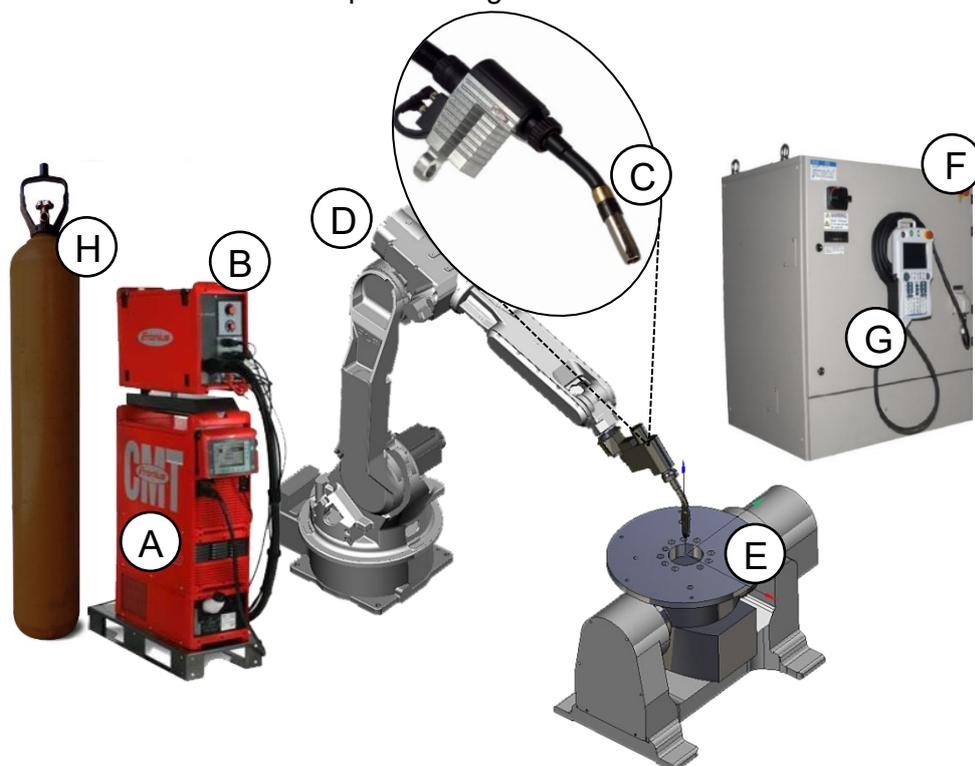
1. Caracterização do processo de soldagem e comparativo entre misturas gasosas com vistas a transferência metálica e geometria do cordão
2. Mapeamento e caracterização de faixa operacional da variante CMT
3. Análise da influência da temperatura sobre o processo de deposição e desenvolvimento de estratégias de controle da temperatura interpasse
4. Concepção de diretrizes operacionais de para o planejamento da trajetória e dos parâmetros de deposição/soldagem
5. Concepção, desenvolvimento e validação de algoritmo de predição de parâmetros

Fonte: Autor.

## 4.2 CARACTERIZAÇÃO E COMPARATIVO DE MISTURAS GASOSAS COM VISTAS A TRANSFERÊNCIA METÁLICA E GEOMETRIA DO CORDÃO

Neste trabalho, para a execução e desenvolvimento dos ensaios de soldagem bem como das demais atividades concernentes ao objetivo geral foi utilizado uma célula de soldagem composta por um robô antropomórfico de seis graus de liberdade, sincronizado a uma base manipuladora de dois graus de liberdade e uma fonte de soldagem esquematicamente descrita na Figura 23.

Figura 23 – Representação esquemática da bancada de experimentos, onde: A) Fonte de soldagem Fronius CMT Advanced 4000R com controlador RCU 5000i; B) Cabeçote de alimentação de arame principal; C) Tocha de soldagem Fronius Robacta; D) Robô antropomórfico Yaskawa Motoman HP20D de 6 eixos e 20 kg de payload; E) Base articulada Motopos MPD250B com 2 eixos e 250 kg de payload; F) Unidade de controle Yaskawa Motoman DX100; G) IHM Teach Pendant DX100; H) Cilindro de gás de proteção para soldagem.



Fonte: Autor.

Para o estudo e diferenciação dos efeitos associados a quantidade de CO<sub>2</sub> na mistura gasosa sobre o comportamento da transferência metálica com alimentação dinâmica no processo GMAW, deposições foram conduzidas em diferentes condições operacionais da variante CMT, utilizando unicamente a linha sinérgica 1362 (versão 2.3.8.5).

Os ensaios de soldagem foram conduzidos utilizando chapas de aço carbono ASTM A36 como corpos de prova para soldagem. A composição química dessas chapas está detalhada no item 1 da Tabela 1, com uma espessura de 9,52 mm, uma largura de 76,2 mm e um comprimento de 220 mm. O material de adição empregado foi o arame de aço ER70S6, com um diâmetro de 1,2 mm, e sua composição química está especificada no item 2 da Tabela 1.

Tabela 1 – Composição química nominal do substrato e metal de adição.

<b>Aço carbono ASTM A36</b>										
	C (%)	Cu (%)	Cr (%)	Mn (%)	Mo (%)	Ni (%)	P (%)	S (%)	Si (%)	V (%)
1	0,18	0,17	0,16	0,68	0,020	0,07	0,011	0,016	0,20	0,003
<b>AWS A5.18 ER70S6</b>										
	C (%)	Cu (%)	Cr (%)	Mn (%)	Mo (%)	Ni (%)	P (%)	S (%)	Si (%)	V (%)
2	Mín	0,06	-	1,40	-	-	-	-	-	-
	Máx	0,15	0,5	1,85	0,15	0,15	0,025	0,035	-	0,03

Fonte: Gerdau [80] e Weld-Inox [81].

A variação da concentração de CO<sub>2</sub> na mistura foi realizada por meio de três misturas gasosas distintas. A primeira consistiu em argônio puro, com uma pureza de 99,99% (Ar). A segunda mistura com 8% de dióxido de carbono em 92% de argônio (C8). Por fim, a terceira mistura com 25% de dióxido de carbono em 75% de argônio (C25).

A matriz de experimentos levou em consideração a deposição de cordões de 100 mm de comprimento sobre chapa de aço carbono ASTM A36 variando o gás de proteção em Ar, C8 e C25, a velocidade de alimentação e velocidade de deslocamento. A matriz de experimentos utilizada está descrita na Tabela 2.

Tabela 2 – Matriz de experimentos para o comparativo entre misturas gasosas.

Gás	VA programada (m/min)	VD (cm/min)	DBCP (mm)	VG (l/min)
Ar	4,0	30	15	12
	5,0			
	6,0			
	7,0			
	8,0			
C8	4,0	30	15	12
	5,0			
	6,0			
	7,0			
	8,0			
C25	4,0	30	15	12
	5,0			
	6,0			
	7,0			
	8,0			

Fonte: Autor.

Para a aquisição dos sinais elétricos (tensão e corrente) e velocidade de alimentação de arame, foi utilizado um sistema de aquisição portátil da marca IMC, modelo SAP V4.0. As especificações técnicas deste equipamento podem ser encontradas na Tabela 3.

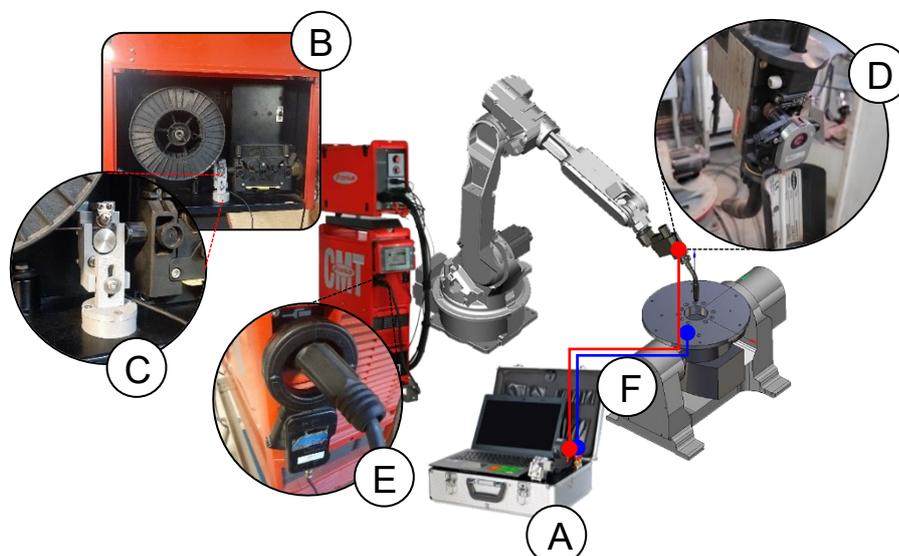
Tabela 3 – Sistema de aquisição portátil (SAP).

Equipamento	Descrição
	<p><b>SAP V4.0</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Taxa de aquisição: 5 kHz <math>\pm</math> 0,1%</li> <li>• Corrente: -600 - 600A <math>\pm</math> 2% com resolução de 1A.</li> <li>• Tensão: -100 - 100V <math>\pm</math> 1% com resolução de 0,1 V</li> <li>• Vazão de gás: 20 l/min <math>\pm</math> 3% com resolução de 0,1 l/min</li> <li>• Velocidade de arame: 0 - 25 m/min <math>\pm</math> 2% com resolução de 0,1 m/min</li> <li>• Temperatura: 50 a 1300 °C termopar tipo K</li> </ul>

Fonte: IMC [82].

Utilizando o SAP V4.0 foram aquiridos os sinais elétricos, ou seja, corrente e tensão do processo. A corrente foi aquirida por meio de um sensor de efeito Hall posicionado no cabo de obra e a tensão foi obtida a partir de conectores entre tocha de soldagem e peça de trabalho. Os sinais referentes à dinâmica de alimentação de arame, foram mensurados tanto no tracionador principal, localizado no cabeçote de alimentação, como do tracionador secundário (servomotor) acoplado na tocha, este responsável pelo movimento de avanço e recuo do arame no modo CMT. A Figura 24 ilustra a disposição dos sensores integrados ao SAP na bancada de ensaios.

Figura 24 – Disposição dos sensores utilizados para aquisição das variáveis de soldagem, onde: A) SAPV4.0; B) Cabeçote de alimentação; C) Encoder MVA médio; D) Encoder MVA instantâneo; E) Sensor de efeito Hall; F) Cabos para medição de Tensão



Fonte: Autor.

Para complementar a análise realizada por meio dos sinais oriundos do SAP, filmagens em alta velocidade foram realizadas para não só observar, mas também validar as hipóteses criadas com base nos sinais dos encoders. Portanto, para aquisição dos fenômenos concernentes à dinâmica da transferência metálica do processo de soldagem analisado, foi utilizado um sistema de filmagem em alta velocidade. O sistema é composto por uma câmera IDT Motion Pro Y4-S2, munida de uma lente Canon EF 180 mm L USM, um duplicador Canon 2x, um filtro ótico Edmund Optics, um sistema de iluminação Laser Cavitar Cavilux HF e um sistema de aquisição de dados IDT, DAS Motion Pro, os quais estão listados e descritos na Tabela 4. As filmagens advindas do sistema de filmagem em alta velocidade foram tratadas e analisadas utilizando o software Motion Studio em conjunto com o Matlab R2020a.

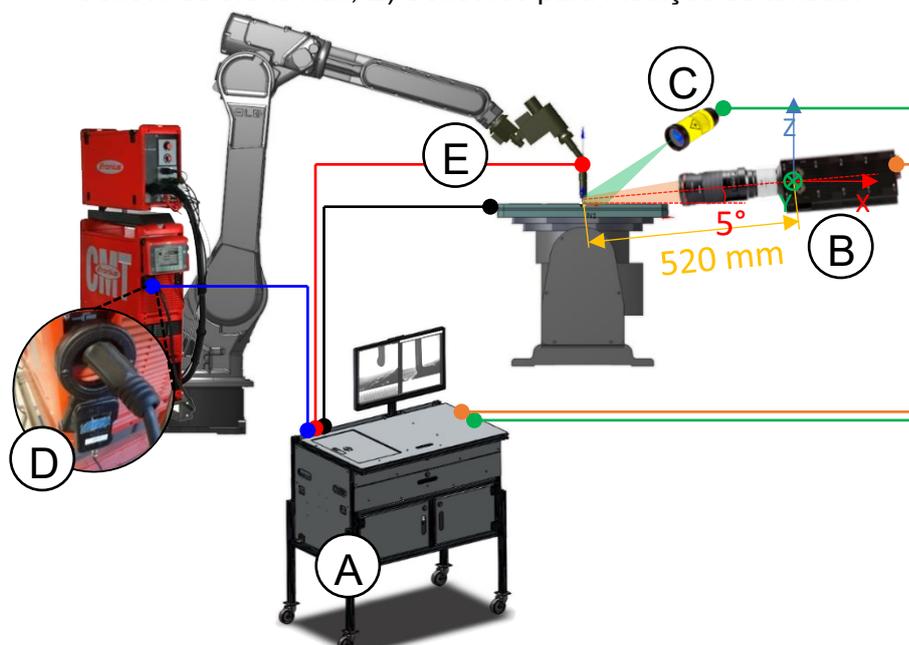
Tabela 4 – Lista de equipamento que compõem o sistema de aquisição de imagens em alta velocidade IDT.

Equipamento	Descrição
	<p><b>Câmera IDT, Y4-S2</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Taxa de aquisição: máx. 4500 quadros por segundo para a máx. resolução</li> <li>• Resolução: 1016 x 1016 px</li> <li>• Tempo de gravação na maior resolução: 1.37s equivalente a 6201 Frames</li> </ul>
	<p><b>Lente Canon EF 180 mm L USM</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Diâmetro: 72 mm</li> <li>• Abertura: f/3.5</li> </ul>
	<p><b>Duplicador Canon Extender EF 2X III</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ampliação: 2x</li> </ul>
	<p><b>Filtro Edmund Optics, 810 ± 10 nm</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Filtro: Passa banda 810 nm (half width 10 nm)</li> <li>• Diâmetro: 50 mm</li> </ul>
	<p><b>Sistema de iluminação Laser Cavitar, CAVILUX HF</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Laser classe 4</li> <li>• Potência de pulso: 500 W ± 10%</li> <li>• Tempo do pulso &lt; 50 ns</li> <li>• Comprimento de onda: 810 ± 10 nm</li> </ul>
	<p><b>Sistema de aquisição de dados IDT, DAS Motion Pro</b></p> <p><b>Entradas analógicas</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Número de canais: 16</li> <li>• Resolução dos conversores: 16 bits</li> <li>• Taxa de aquisição máxima: 500 kHz</li> <li>• Tensão de entrada máxima: ±10 V</li> </ul> <p><b>Saídas analógicas</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Número de canais: 4</li> <li>• Resolução dos conversores: 16 bits</li> <li>• Taxa de aquisição máxima: 500 kHz</li> <li>• Tensão de saída máxima: ±10 V</li> </ul>

Fonte: IDT Motion [83], Cavitar [84] e Canon [85] [86].

A disposição da câmera em relação região de interesse foi definida em um plano inclinado em cinco graus colinear ao sentido de soldagem, conforme ilustra o esquemático do posicionamento na Figura 25.

Figura 25 – Disposição dos equipamentos utilizados para realização da filmagem em alta velocidade e aquisição das variáveis de soldagem, onde: A) Unidade de controle da câmera de alta velocidade e periféricos; B) Câmera IDT Y4-S2; C) Iluminação Laser Cavitar; D) Sensor de efeito Hall; E) Sensores para medição de tensão.



Fonte: Autor.

#### 4.2.1 Critérios de estabilidade para definição de faixa operacional

Inicialmente, foi realizada uma análise de estabilidade na faixa operacional para definir os limites a serem estudados e verificar a precisão da transferência metálica. O conceito de estabilidade na soldagem pode ser simplesmente descrito como o ato de manter o processo em funcionamento repetitivo, preservando suas características elétricas e físicas ao longo da operação, tais como corrente e tensão, velocidade de arame, ruído, luminosidade e continuidade do cordão, sem necessariamente otimizá-lo para uma determinada aplicação. Surge, então, a questão de como mensurar e quantificar a estabilidade do processo de soldagem e identificar as fontes de instabilidade, a fim de definir uma faixa de operação estável.

Alguns autores, como Lankin [87], Kumar et al. [88, 89], Huang et al. [48], kang e Rhee [90], Suban e Tusek [91], Roca et al. [92], Silva et al. [93] e Galeazzi et al. [27] apresentam métodos para mensurar, de forma qualitativa ou quantitativa, a

estabilidade do processo. Geralmente, esses métodos se concentram em verificar a continuidade entre os ciclos de transferência, observando a tensão, corrente, período de transferência e até o ruído gerado pelo processo. Isso é feito por meio de índices estatísticos como desvio padrão, variância, coeficiente de variação ou desvio padrão relativo.

Estes métodos são bastante eficazes para lidar com operações que utilizam o processo GMAW convencional. No entanto, quando aplicados a processos controlados, podem distorcer e erroneamente inferir estabilidade ou instabilidade. Isso é notável na variante CMT, a qual envolve um controle misto, abrangendo tanto a forma de onda de corrente quanto a velocidade de alimentação, conforme visto na seção 3.1. Ambos, quando combinados, se apresentam como um modo de transferência metálica exclusivo, que pode ser referido como transferência metálica eletromecanicamente assistida. Diante dessa dificuldade, foram desenvolvidos dois métodos específicos de análise de estabilidade para a variante CMT, abrangendo tanto a análise da transferência metálica, através de filmagens em alta velocidade, quanto os sinais elétricos de soldagem.

O primeiro método se concentrou na avaliação da precisão do ciclo de transferência, através da verificação de cada estágio do processo, por meio da análise simultânea dos sinais de tensão e corrente ao longo de 5 segundos de aquisição. Esta análise foi conduzida com base na verificação prévia de  $n$  ciclos considerados satisfatórios, dos quais extraiu-se valores de referência, notadamente, os valores de corrente no início do curto-circuito e na reabertura subsequente, a partir de um valor de tensão de referência, neste caso, 7 V.

O valor de corrente de referência para o início do curto-circuito foi calculado a partir da média de 5 leituras posteriores à primeira leitura de tensão abaixo do valor de referência. Para o cálculo da corrente de referência na reabertura, utilizou-se a média de 5 leituras anteriores à primeira leitura acima da referência. Utilizando esses valores em comparação com os obtidos ao aplicar a mesma metodologia ao longo do período amostral proposto, foi calculado o número de acertos, ou seja, a quantidade de ciclos que passaram por todas as etapas esperadas e foram considerados satisfatórios. Para o cálculo do número de acertos, utilizou-se o seguinte critério: se a média e o desvio padrão de cinco leituras exceder o valor de referência e seu desvio padrão em qualquer uma dessas etapas, início do curto-circuito ou reabertura, o ciclo

é classificado como inadequado; caso contrário, é classificado como satisfatório. A equação (26) expressa algebricamente a lógica criada.

$$C = \sum_{i=1}^n x_i \quad \text{se} \begin{cases} I_c \pm \sigma_{I_c} \in [I_{cref} - \sigma_{I_{cref}}, I_{cref} + \sigma_{I_{cref}}] \\ I_r \pm \sigma_{I_r} \in [I_{rref} - \sigma_{I_{rref}}, I_{rref} + \sigma_{I_{rref}}] \end{cases} \quad (1)$$

Onde:

C = número de ciclos satisfatórios;

n = número total de ciclos;

$x_i$  = Contador de ciclos satisfatórios;

$I_c$  = Corrente média de 5 leituras no início do curto-circuito (A);

$I_r$  = Corrente média de 5 leituras na reabertura do arco (A);

$I_{cref}$  = Corrente de referência no início do curto-circuito (A);

$I_{rref}$  = Corrente de referência na reabertura do arco (A);

$\sigma_{I_c}$  = Desvio padrão da corrente no início do curto-circuito (A);

$\sigma_{I_r}$  = Desvio padrão da corrente na reabertura do arco (A);

$\sigma_{I_{cref}}$  = Desvio padrão da corrente de referência no início do curto-circuito (A);

$\sigma_{I_{rref}}$  = Desvio padrão da corrente de referência na reabertura do arco (A);

Por fim, a partir do número de ciclos considerados satisfatórios, calculou-se o percentual de acertos ao longo dos n ciclos (Equação (26)). A avaliação de estabilidade é determinada por um limiar de 80%, a partir do qual o processo é considerado estável.

$$A = \frac{C}{n} \cdot 100 \quad (2)$$

Onde:

A = Percentual de acertos (%);

C = número de acertos satisfatórios;

n = total de ciclos.

O segundo método concentrou-se no cálculo da entropia por meio do método de Shannon, a qual é fundamentada nos princípios da teoria da informação. Inicialmente, realizou-se a identificação dos símbolos distintos presentes no sinal de tensão em um período amostral de 5 segundos de aquisição. Posteriormente, efetuou-se a contagem da frequência de ocorrência de cada símbolo, o que proporciona uma visão quantitativa da distribuição dos elementos no conjunto analisado. Com base nessa contagem, as probabilidades individuais de ocorrência para cada símbolo são determinadas. A fim de assegurar a estabilidade do cálculo, quaisquer elementos associados a probabilidades nulas foram excluídos da análise. A entropia é, então, calculada mediante a aplicação da fórmula de Shannon, que envolve a soma das probabilidades multiplicadas pelo logaritmo na base 2 das mesmas, expresso na equação (3). Por fim, a entropia é normalizada dividindo-se o resultado pelo logaritmo na base 2 do número total de símbolos contidos no sinal.

$$H(U) = - \sum_{i=1}^n p(U_i) \cdot \log p(U_i) \quad (3)$$

Onde:

$H(U)$  = entropia de tensão;

$U$  = Tensão de soldagem;

$p(U_i)$  = Probabilidade de o  $i$ -ésimo valor de tensão.

Estes procedimentos ofereceram uma medida objetiva da incerteza inerente ao sinal, possibilitando uma avaliação quantitativa do nível de dispersão dos dados. Isso, por sua vez, permitiu a mensuração da estabilidade do processo e viabilizou a delimitação da faixa operacional viável com base na estabilidade.

#### 4.2.2 Critérios de medição dos aspectos elétricos do processo

Posteriormente a essa análise de estabilidade e a delimitação da faixa operacional, foi conduzida uma análise dos aspectos relacionados aos sinais elétricos e à dinâmica de oscilação de arame da variante CMT em função do gás de proteção. Neste contexto, as variáveis observadas e analisadas foram: corrente e tensão, potência, aporte térmico, velocidade média e instantânea do arame, bem como suas componentes dinâmicas, ou seja, amplitude de avanço e recuo, velocidade máxima de avanço e recuo, tempo de curto, tempo de arco, frequência de destacamento e diâmetro de gota. Essas medições foram realizadas ao longo de um período amostral de 5 segundos de aquisição, onde extraiu-se médias e desvios associados.

A corrente e tensão média foram calculadas por meio da média aritmética dos sinais instantâneos ao longo de 5 segundos de aquisição. A Potência foi calculada a partir da média do produto entre os valores instantâneos de tensão e corrente, conforme expressa a equação (26).

$$P_{inst} = \sum_{i=1}^n \frac{I_i \cdot U_i}{n} \quad (4)$$

Onde:

$P_{inst}$  = Potência instantânea (W);

I = Corrente instantânea (A);

U = Tensão instantânea (V);

n = Comprimento amostral.

O aporte térmico foi calculado a partir da razão entre o produto da potência instantânea e eficiência térmica do processo sobre a velocidade de deslocamento, conforme descreve a equação (5). Para a eficiência utilizou-se o valor de 77%, conforme descrito por Averaldo e Vilarinho [94].

$$E = \frac{P_{inst}}{VS} \cdot \eta_{term} \quad (5)$$

Onde:

$E$  = Aporte Térmico (J/mm);

$P_{inst}$  = Potência instantânea (W);

$VD$  = Velocidade de deslocamento (mm/s);

$\eta_{term}$  = Eficiência térmica (%).

Os tempos médios de curto-circuito e de arco foram determinados com base no sinal de tensão como referência. Inicialmente, estabeleceu-se um limiar de tensão de 7 V. Portanto, qualquer valor de tensão abaixo desse limite foi classificado como curto-circuito, enquanto qualquer valor acima foi identificado como arco. A partir dessa definição condicional, o tempo de curto-circuito foi calculado como o módulo da diferença entre o primeiro valor de tempo lido com sinal de tensão abaixo da referência e o último valor de tempo abaixo da referência. De maneira análoga, o tempo de arco foi calculado para os valores de tempo registrados acima do limiar de referência. Por fim, o tempo médio de curto-circuito e arco é dado pela média dos módulos dos tempos para  $n$  ciclos, conforme define a equação (6).

$$T = \sum_{i=1}^n \frac{|t_1 - t_0|_i}{n} \quad (6)$$

Onde:

$T$  = Tempo de curto-circuito ou arco (ms);

$t_0$  = Tempo de início de curto-circuito ou de arco;

$t_1$  = Tempo de fim de curto-circuito ou de arco;

$n$  = Número de ciclos.

A Frequência de destacamento média foi calculada a partir da média do inverso do período instantâneo, ou seja, a soma do tempo de curto-circuito e tempo de arco, conforme expressa a equação (26).

$$F = \sum_{i=1}^n \frac{1}{(T_c + T_a)_i} \quad (7)$$

Onde:

$F$  = Frequência de destacamento (Hz);

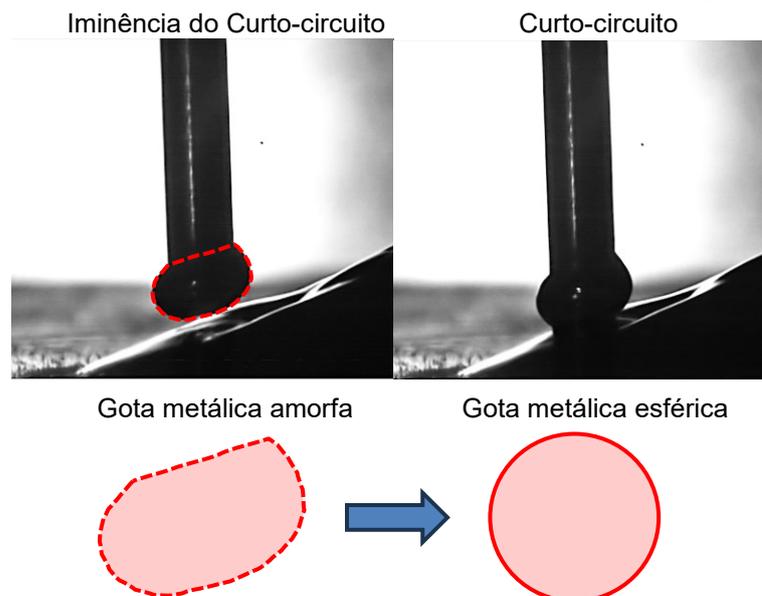
$T_c$  = Tempo de curto-circuito (s);

$T_a$  = Tempo de arco (s);

$n$  = Número de ciclos.

Além dessas métricas, também foi determinado o diâmetro da gota. Esse valor foi calculado a partir de medições realizadas a partir de filmagens em alta velocidade, utilizando o frame no momento imediatamente anterior ao curto-circuito. Dado que o volume de metal líquido presente na extremidade do arame eletrodo possui uma geometria amorfa e assumindo que sua revolução em torno do arame é simétrica, calculou-se, através de integrais, a área deste volume e, a partir dessa área, determinou-se o diâmetro equivalente ajustando-a a equação da área de um círculo, conforme ilustrado no esquema da Figura 26. Para um resultado acurado considerou-se a média de 10 medições.

Figura 26 – Método de definição do diâmetro equivalente da gota metálica.



Fonte: Autor.

#### 4.2.1 Critérios de medição dos aspectos concernentes à dinâmica do arame no processo CMT

Os sinais referentes à dinâmica de movimento do arame foram calculados por meio dos pulsos do encoder, que foram inicialmente tratados a partir conversão dos pulsos em posição através da equação (8), que considerou o produto entre a matriz de pulsos e o comprimento deslocado por pulso do encoder.

$$P = \frac{Pe \cdot \pi \cdot Dr}{Pv} \quad (8)$$

Onde:

P = Posição (mm);

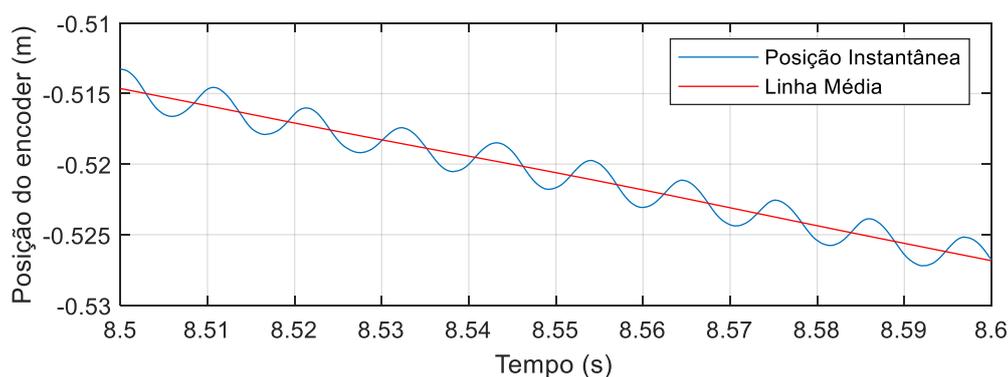
Pe = Pulsos do encoder (Pulsos);

Dr = Diâmetro do rolete acoplado ao encoder;

Pv = Pulsos por volta do encoder.

A partir da conversão dos pulsos em posição instantânea se tem a curva presente na Figura 27, a qual expressa um comportamento senoidal decrescente no tempo, função do consumo contínuo de arame pelo processo.

Figura 27 – Comportamento dinâmico do arame expresso pela sua posição instantânea no tempo.



Fonte: Autor.

Por meio do sinal de posição instantânea do arame no tempo e da equação (9), a seguir, foi possível calcular a velocidade instantânea de arame. Que permitiu uma análise profunda de todas as componentes de velocidade de arame envolvidas.

$$V_{inst} = \frac{P_1 - P_0}{t_1 - t_0} \quad (9)$$

Onde:

$V_{inst}$  = Velocidade Instantânea (m/min);

$P_0$  = Posição inicial (mm);

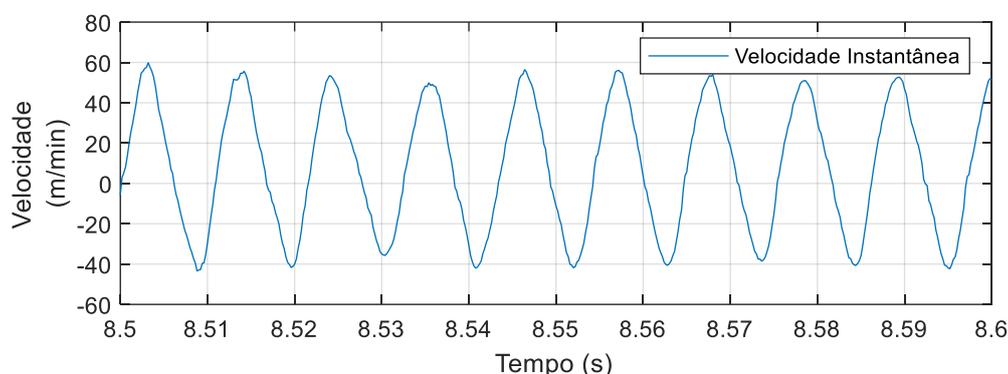
$P_1$  = Posição final (mm);

$t_0$  = Tempo inicial (s);

$t_1$  = Tempo final (s);

A curva de velocidade instantânea obtida aplicando a equação (9) está representada pelo gráfico da Figura 28. Nesta curva a divisão entre recuo e avanço é dado pelo sinal da velocidade, onde a parcela positiva representa o avanço e a parcela negativa representa o recuo.

Figura 28 – Comportamento da velocidade instantânea de arame no tempo.



Fonte: Autor.

Com esses dados de velocidade instantânea foi possível construir um esquema analítico para extração de todas as componentes de velocidade envolvidas no processo de oscilação do arame para toda a faixa analisada. As componentes calculadas e analisadas foram: velocidade média global e as médias e máximas de avanço e recuo, respectivamente.

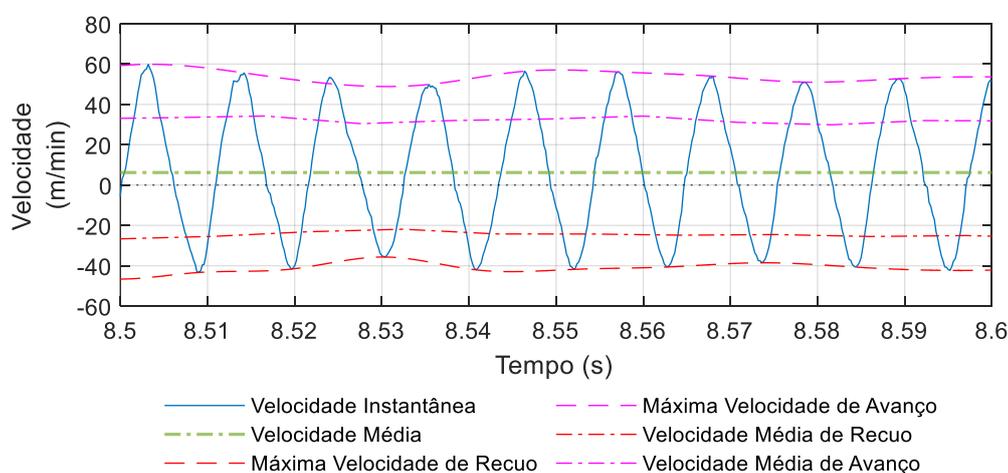
A velocidade resultante de arame foi calculada através da média aritmética do sinal da velocidade de arame instantânea. Para a velocidade de avanço considerou-se a média ciclo a ciclo para os pontos maiores que zero da velocidade instantânea,

ou seja, foi criada uma matriz com as médias das velocidades de arame para cada ciclo de avanço de arame. A média desta matriz, portanto, representa a média global da velocidade de avanço. Para a velocidade de recuo o método utilizado foi o mesmo, porém para os valores menores que zero. Utilizou-se este método para extrair de forma acurada o desvio padrão e a incerteza associada à média da velocidade de avanço e da velocidade recuo.

Para definição da máxima velocidade de avanço e recuo foi utilizado o método de envelope baseado nos limites do sinal. Os envelopes foram determinados utilizando interpolação *spline* sobre os máximos (picos) locais, sendo os máximos positivos para o avanço e os máximos negativos para o recuo. A partir destes dados uma matriz com os valores máximos para o avanço e recuo foi construída, onde se extraiu a média dos máximos e o desvio padrão associado.

Para melhor entendimento das componentes de velocidade extraídas por meio desta análise se tem o gráfico da Figura 29, que ilustra as respectivas curvas para cada componente analisada.

Figura 29 – Componentes de velocidade extraídas a partir da análise da curva de velocidade instantânea.



Fonte: Autor.

Além dos parâmetros referentes à velocidade, variáveis como amplitude de avanço e de recuo foram calculadas, para isto foi utilizado o sinal da velocidade instantânea sincronizado ao sinal de tensão para referenciar os momentos de curto-circuito e arco.

O método utilizado foi empregado para calcular tanto o avanço quanto o recuo do arame. A lógica consistiu em identificar o ponto de início e o ponto de fim do movimento do arame-eletrodo. A partir da integral do sinal de velocidade instantânea em função do tempo durante esse período de movimento, determinou-se a amplitude executada pelo arame-eletrodo. A sincronização com a tensão foi usada para identificar a parte do arame deslocada até o contato com a poça (avanço livre) e a parte deslocada durante o curto-circuito (mergulho ou avanço em ponte). Da mesma forma, para o recuo, também foi calculada a parte do arame deslocada em ponte (recoo em ponte) e a parte deslocada após a ruptura da ponte metálica (recoo livre). É importante ressaltar que, assim como na análise anterior, neste caso também foi construída uma matriz com os valores associados a cada componente da amplitude para cada ciclo ao longo de um período amostral (T) de 5 segundos. Posteriormente, extraiu-se a média e a incerteza associada a esses valores.

As equações utilizadas para definição das componentes de amplitude estão listadas a seguir, onde: a equação (10) representa a amplitude de avanço livre, a equação (11) define o avanço em ponte ou mergulho, a equação (12) expressa a amplitude de recuo em ponte, a equação (13) representa o recuo livre, já a equação (14) e a equação (15) definem a amplitude total para o avanço e para o recuo.

$$A_{al} = \int_{t_0}^{t_1} V_{inst}(t) dt \quad se \quad \begin{cases} U_t > U_{ref} \\ V_{inst_t} > 0 \end{cases} \quad (10)$$

$$A_m = \int_{t_0}^{t_1} V_{inst}(t) dt \quad se \quad \begin{cases} U_t < U_{ref} \\ V_{inst_t} > 0 \end{cases} \quad (11)$$

$$A_{ra} = \int_{t_0}^{t_1} V_{inst}(t) dt \quad se \quad \begin{cases} U_t < U_{ref} \\ V_{inst_t} < 0 \end{cases} \quad (12)$$

$$A_{rl} = \int_{t_0}^{t_1} V_{inst}(t) dt \quad se \quad \begin{cases} U_t > U_{ref} \\ V_{inst_t} < 0 \end{cases} \quad (13)$$

$$A_{avanço} = A_{al} + A_m \quad (14)$$

$$A_{recoo} = A_{rp} + A_{rl} \quad (15)$$

Onde:

$A_{al}$  = Amplitude de avanço livre (mm);

$A_m$  = Amplitude de avanço em ponte ou mergulho (mm);

$A_{ra}$  = Amplitude de recuo em ponte (mm);

$A_{rl}$  = Amplitude de recuo livre (mm);

$A_{avanço}$  = Amplitude total de avanço (mm);

$A_{recao}$  = Amplitude total de recuo (mm);

$V_{inst}$  = Velocidade instantânea (mm/s);

$t_0$  = Início do evento (s);

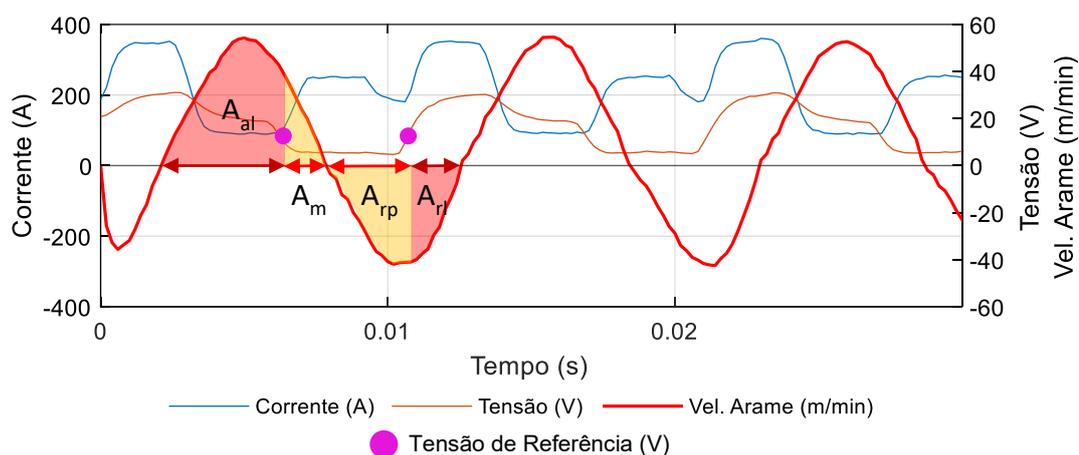
$t_1$  = Fim do evento (s);

$U_t$  = Tensão instantânea (V);

$U_{ref}$  = Tensão de referência.

A Figura 30 mostra os sinais de tensão, corrente, velocidade instantânea de arame e delimitações correspondentes a cada componente da amplitude onde o cálculo integral foi realizado.

Figura 30 – Oscilograma de corrente e tensão sincronizados a velocidade instantânea de arame, com a delimitação de cada trecho referente a amplitude de avanço e recuo do arame.



Fonte: Autor.

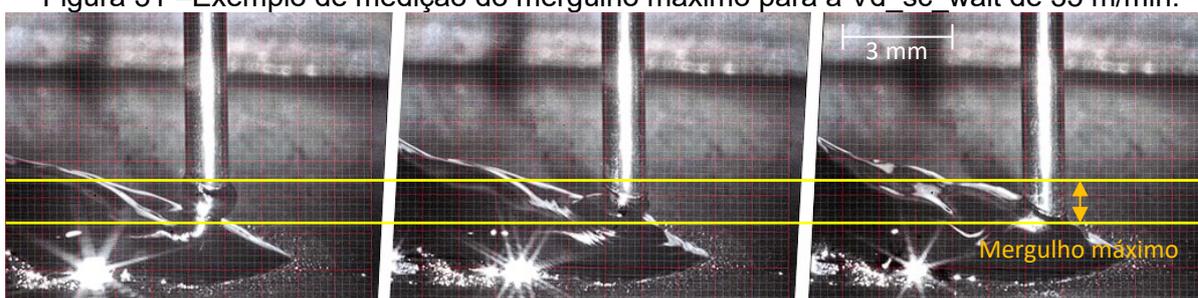
Para analisar os aspectos relativos ao comportamento dinâmico da poça de fusão, como a formação da ponte, o alongamento da ponte metálica, o mergulho do arame eletrodo na poça e a formação do volume a ser transferido, foram conduzidos experimentos assistidos pela filmagem em alta velocidade. As filmagens foram

análises sob uma amostra de aproximadamente 1000 frames a uma taxa de 5000 quadros por segundo, conferindo, na média, a análise de um total de 10 ciclos completos de transferência. Para as medições utilizou-se o software Motion Studio e uma máscara de grid com resolução de 0,2 mm sobre os frames, por fim o software Matlab R2020a foi utilizado para tratamento estatístico dos dados.

Além disto, experimentos foram realizados para verificação de uma hipótese concernente a inércia de movimento do arame eletrodo em relação ao mergulho do arame na poça de fusão. Para isto, utilizando o modo “otimizar curva sinérgica” da fonte de soldagem alterou-se os valores da variável “vd\_sc\_wait” que representa a velocidade de avanço do arame eletrodo em m/min. os experimentos se concentraram na VA programada de 4 m/min e mistura gasosa C8, os valores testados foram: 25, 35, 45 e 55 m/min, onde 25 m/min é o valor nominal da curva sinérgica para a VA de 4 m/min. A instrumentação utilizada para estes testes foi o sistema de filmagem em alta velocidade já descrito na Tabela 4. Por meio da filmagem em alta velocidade o mergulho do eletrodo foi medido para todas as velocidades de avanço programadas, para um conjunto amostral de 10 ciclos cada.

As medições foram feitas do ponto em que se iniciou o curto-circuito até o mergulho máximo lido como a parada total do arame, para isto utilizou-se o software Motion Studio e uma máscara de grid com resolução de 0,2 mm sobre os frames, o esquema da Figura 31, ilustra a estratégia de medição.

Figura 31 –Exemplo de medição do mergulho máximo para a Vd\_sc\_wait de 35 m/min.



Fonte: Autor.

Outra hipótese avaliada diz respeito a influência da mistura gasosa no perfil térmico praticado pelo processo. Sendo assim, para verificação desta hipótese experimentos aquisitando os sinais referentes ao comportamento térmico de cada mistura gasosa foram conduzidos, para isto foi utilizado uma câmera para filmagem

em infravermelho marca FLIR modelo SC 7200, a qual tem suas especificações técnicas descritas na Tabela 5.

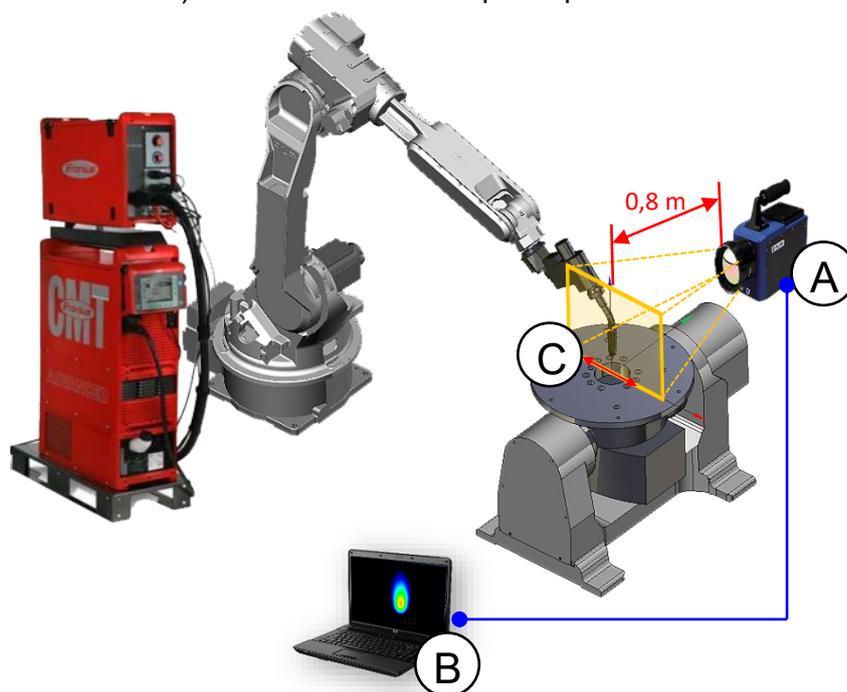
Tabela 5 – Especificações técnicas da câmera FLIR SC 7200.

Equipamento	Descrição
	<p style="text-align: center;"><b>Câmera FLIR, SC 7200</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Sensor: Fotônico</li> <li>• Taxa de aquisição: 175 Hz para a máx. resolução</li> <li>• Resolução máxima: 320 x 256 px</li> <li>• Tamanho do Pixel: 30 <math>\mu\text{m}</math></li> <li>• Distância focal: 50 mm</li> <li>• Abertura: f/3.5</li> <li>• Faixa de aquisição: 5 a 3000 °C</li> </ul>

Fonte: Flir [95].

Os experimentos consistiram na deposição de cordões simples sobre chapa utilizando a VA programada de 5 m/min e uma velocidade de deslocamento de 30 cm/min, ao longo de 100 mm e variando as misturas gasosas entre argônio, C8 e C25. A filmagem térmica foi realizada utilizando além da câmera já descrita o software Altair 5.91.010. A disposição dos equipamentos utilizada na bancada de experimentos é descrita esquematicamente pela Figura 32, onde a câmera foi posicionada a 0,8 m da região de interesse em um plano perpendicular à base.

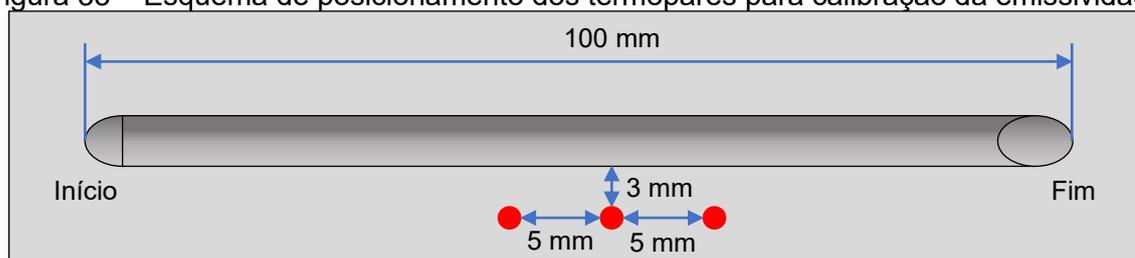
Figura 32 – Disposição dos equipamentos utilizados para realização da filmagem térmica, onde: A) Câmera térmica FLIR SC 7200; B) Laptop munido com software Altair 5.91.010 e C) Plano de interesse captado pela câmera.



Fonte: Autor.

Anteriormente aos experimentos uma etapa de calibração da emissividade foi realizada utilizando o SAP e termopares tipo K. Em uma chapa de aço foram fixados termopares e uma deposição realizada, a qual foi monitorada tanto pelo SAP como pela câmera térmica, conforme mostra o esquema da Figura 33.

Figura 33 – Esquema de posicionamento dos termopares para calibração da emissividade.



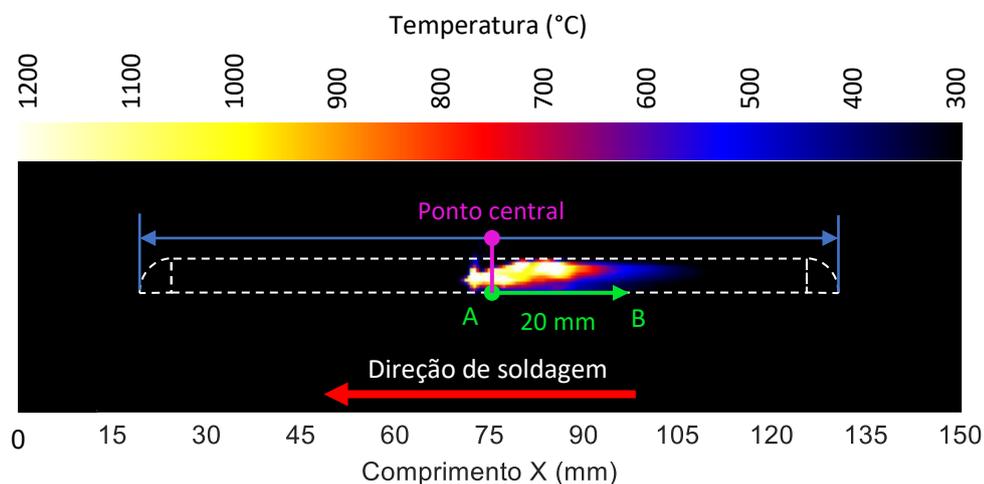
Fonte: Autor.

A calibração envolveu a determinação de uma emissividade que correspondesse à temperatura lida pelo termopar em uma faixa de 300 a 1000 °C. Neste caso, a emissividade calibrada foi de 0,81, respectivamente.

Para a análise dos dados, foi empregado o cálculo do gradiente térmico ao longo de 20 mm a partir do centro do cordão e após a passagem do arco. Essa medição foi realizada em uma região próxima à base do cordão e em um ponto onde

a temperatura atingisse aproximadamente 1000 °C, representado pelo Ponto A na Figura 34, à qual ilustra esquematicamente o método de medição adotado para o cálculo do gradiente térmico no trecho AB.

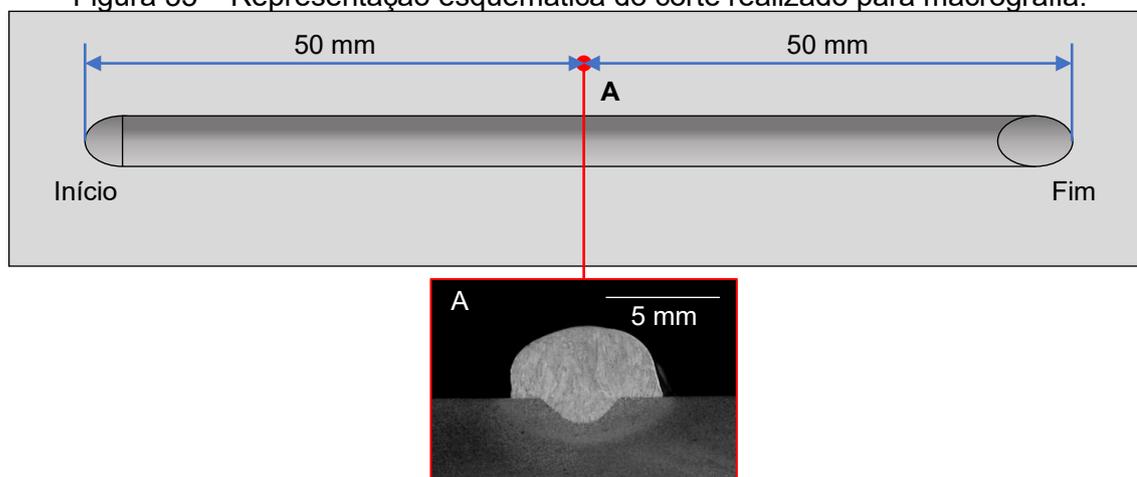
Figura 34 – Esquema de medição da temperatura para cálculo do gradiente térmico.



Fonte: Autor.

A morfologia dos depósitos foi avaliada utilizando inspeção visual da superfície do cordão e macrografia do trecho central, conforme esquema de corte da Figura 35.

Figura 35 – Representação esquemática do corte realizado para macrografia.



Fonte: Autor.

As macrografias foram preparadas utilizando o seguinte procedimento:

- Corte via cut-off;
- Lixamento utilizando a seguinte sequência granulométrica: 80, 120, 320, 600, 1200;
- Polimento utilizando alumina com granulometria média de 1 µm;
- Ataque químico com Nital 10% por 5 segundos.

Para o registro fotográfico das macrografias produzidas ao longo do trabalho uma câmera fotográfica de uma lente macro e um duplicador, em conjunto com sistema de iluminação LED foi utilizado. A Tabela 6 apresenta as descrições técnicas do arranjo utilizado.

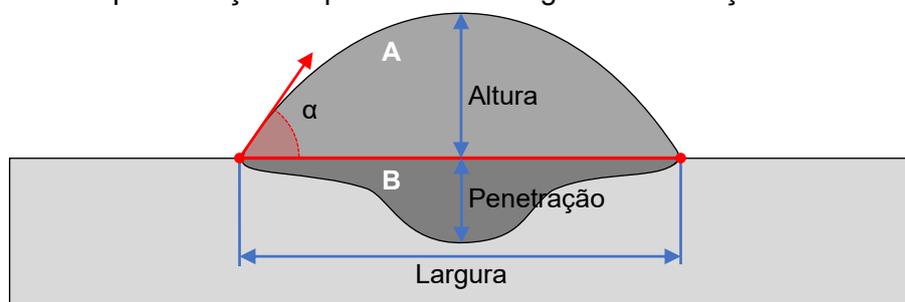
Tabela 6 – Câmera, lentes e iluminação utilizados para registro das macrografias.

Item	Equipamento	Descrição
a)		<p><b>Câmera Canon EOS 60D</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Resolução máxima: 5184 x 3456</li> <li>• Sensor CMOS APS-C de 18 MP</li> </ul>
b)		<p><b>Duplicador Canon Extender EF 2X III</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ampliação: 2x</li> </ul>
c)		<p><b>Lente EF 180mm f/3.5L Macro USM</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Diâmetro: 72 mm</li> <li>• Abertura: f/3.5</li> </ul>
d)		<p><b>Refletor LED Fancierstudio 576 LED Light Panel</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Dimensões: 23 x 23 x 2,5 cm</li> <li>• Temperatura da cor: 5600K</li> <li>• Potência: 40 W</li> </ul>

Fonte: Canon [85, 86, 96] e Fancierstudio [97].

Para caracterização geométrica das macrografias um algoritmo foi desenvolvido no software Matlab R2020a (Apêndice A) para a mensurar a altura, largura, penetração, ângulo de molhamento  $\alpha$  e diluição (razão entre a área B e AB), a Figura 36 ilustra esquematicamente as regiões de interesse das macrografias.

Figura 36 – Representação esquemática das regiões de medição das macrografias.



Fonte: Autor.

#### 4.3 MAPEAMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE FAIXA OPERACIONAL DA VARIANTE CMT PARA O ARAME ER70S6

Em sequência a etapa de análise e caracterização de diferentes misturas gasosas foi realizado o mapeamento de uma faixa operacional da variante CMT 1362 (versão 2.3.8.5) para o arame de aço ER70S-6 de 1,2 mm de diâmetro e a mistura gasosa C8. Nesta etapa, manteve-se a bancada e instrumentação apresentada na Figura 24. Para os experimentos foram depositados cordões de 150 mm de comprimento sobre chapa de aço carbono ASTM A36 com as mesmas dimensões descritas no item 4.2.

Nesta fase concentrou-se em verificar a influência da DBCP, velocidade de alimentação de arame e velocidade de deslocamento sobre a estabilidade do processo, características elétricas, propriedades da transferência metálica e perfil geométrico do cordão resultante, verificando assim a influência destas variáveis sobre a morfologia do cordão de solda. O mapeamento do processo foi realizado utilizando como base a matriz de ensaios apresentada na Tabela 7.

Tabela 7 – Matriz de experimentos utilizada para o mapeamento da variante CMT.

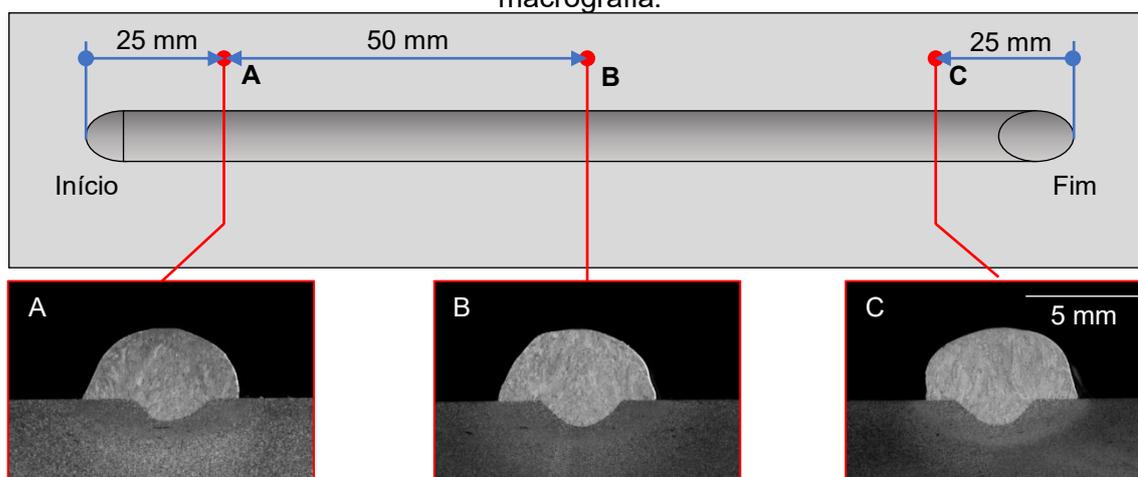
VA Programada (m/min)	VD (cm/min)	VD (mm/s)	DBCP (mm)	VG (L/min)
4,0	30	5,0	10 15 20	12
	45	7,5		
	60	10,0		
	75	12,5		
5,0	30	5,0	10 15 20	12
	45	7,5		
	60	10,0		
	75	12,5		
6,0	30	5,0	10 15 20	12
	45	7,5		
	60	10,0		
	75	12,5		
7,0	30	5,0	10 15 20	12
	45	7,5		
	60	10,0		
	75	12,5		

Os sinais observados e mensurados foram: Os sinais elétricos referentes a forma de onda adotada, velocidade de alimentação, aporte térmico, tempo de curto, tempo de arco e frequência de destacamento; para realização desta etapa foi utilizado

o SAP V4.0, descrito na Tabela 3, para aquisição dos sinais. Além disso, o sistema de filmagem em alta velocidade também foi empregado para verificação de características dinâmicas do processo oriundas da variação de DBCP, isto é, velocidades de avanço e recuo, amplitudes de avanço e recuo, diâmetro das gotas, taxas de estricção e demais características. Para o tratamento e condicionamento dos sinais foi utilizado o software Matlab 2020a, seguindo a mesma metodologia apresentada no item 4.2.

A caracterização geométrica dos cordões depositados foi efetuada por meio de macrografias capturadas em três seções distintas – início, meio e fim do cordão – seguindo o procedimento delineado no item 4.2 e conforme a disposição apresentada na Figura 37. As macrografias foram obtidas utilizando os equipamentos especificados na Tabela 6 e as medições foram realizadas de acordo com o que se apresenta na Figura 36, empregando o algoritmo detalhado no Apêndice A.

Figura 37 – Representação esquemática do corte realizado em três trechos para macrografia.



Fonte: Autor.

Inicialmente, foi realizado uma análise para avaliar o efeito da velocidade de deslocamento sobre as características elétricas e a velocidade de alimentação do arame, utilizando-se para isto a Análise de Variância (ANOVA). Para a análise de variância observou-se os valores- $p$ , para valores- $p$  menores que 0.05 rejeitou-se a hipótese nula ( $H_0$ ), ou seja, verifica-se uma diferença significativa em pelo menos uma das médias, e acima de 0.05 aceitou-se  $H_0$ , isto é, não existe uma diferença significativa entre as médias. Após esta análise preliminar, o estudo foi expandido para investigar a impacto da DBCP sobre as características do processo de soldagem CMT,

incluindo parâmetros elétricos, velocidades de avanço e recuo, amplitudes de avanço e recuo, diâmetro das gotas, taxas de estrição, consumo de arame.

Posteriormente, realizou-se a análise do impacto combinado da DBCP e da VD sobre as características geométricas dos cordões depositados. Para isso, foram realizados testes de hipótese (ANOVA) em conjuntos de dados agrupados por velocidade de arame programada, variando a DBCP e a VD. O objetivo desses testes foi determinar se essas variáveis influenciam significativamente as características geométricas, isto inclui: largura, altura, penetração, ângulo de molhamento e diluição dos cordões depositados.

Além da análise de variância, foi realizado uma análise de correlação entre as variáveis, para verificar a direção e intensidade da correlação entre as variáveis, sendo estas: DBCP, VD, VA, largura, altura, penetração, ângulo de molhamento e diluição. Para isso, foi criado um método híbrido baseado nos métodos de Pearson e Spearman.

O coeficiente de correlação de Pearson é uma medida estatística que quantifica a relação linear entre duas variáveis contínuas, medindo tanto a força quanto a direção dessa relação linear. Para calcular o coeficiente de Pearson utiliza-se sua respectiva equação, descrita na equação (26), onde  $x_i$  e  $y_i$  são os valores individuais das duas variáveis que estão sendo comparadas,  $\bar{x}$  e  $\bar{y}$  são as médias dos valores de  $x$  e  $y$ , respectivamente. Primeiro calcula-se a diferença entre cada valor e a média da sua respectiva variável. Em seguida, multiplica-se essas diferenças para cada par de observações e soma-se todos esses produtos. Isso é o numerador da equação e representa a covariância entre  $x$  e  $y$ . No denominador, primeiro calcula-se a soma dos quadrados das diferenças de cada variável em relação à sua média. Sendo esta, uma medida da variação total em cada variável. Multiplica-se as somas dos quadrados para  $x$  e  $y$ , em seguida, tira-se a raiz quadrada desse produto. Isso normaliza a covariância, transformando-a em uma medida de correlação. O resultado é um valor entre -1 e 1. Um valor de 1 indica uma correlação positiva perfeita (quando uma variável aumenta, a outra também aumenta), -1 indica uma correlação negativa perfeita (quando uma variável aumenta, a outra diminui), e 0 indica que não há correlação linear entre as variáveis [98].

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (16)$$

O coeficiente de Pearson é eficaz para identificar relações lineares, mas não é adequado para capturar relações não-lineares. Para análises que envolvem relações não-lineares, o método de Spearman é considerado mais adequado.

O coeficiente de correlação de Spearman, diferente do método de Pearson, é uma medida estatística que avalia a relação monotônica entre duas variáveis, não apenas a relação linear. Para calcular o coeficiente de Spearman, conforme descrito pela equação (26), primeiramente classificam-se os valores das variáveis em ordem crescente. Em seguida, para cada par de observações, calcula-se a diferença entre os rankings de  $x$  e  $y$ , indicada por  $d_i$ . Esta diferença é elevada ao quadrado e todas essas diferenças são somadas. No denominador, procede-se com a normalização do coeficiente, ou seja, ajusta-se a soma das diferenças ao quadrado de modo que o valor do coeficiente de Spearman varie entre -1 e 1, similarmente ao método de Pearson [98].

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n d_i^2}{n(n^2 - 1)} \quad (17)$$

Na abordagem metodológica adotada neste estudo, a primeira etapa consiste no cálculo da matriz de correlação, empregando o coeficiente de Pearson. Este coeficiente é utilizado para mensurar a correlação linear entre as colunas da matriz de dados. Posteriormente, procede-se com o cálculo da matriz de correlação utilizando o coeficiente de Spearman, a fim de capturar a correlação monotônica entre as variáveis.

As duas matrizes de correlação são comparadas, e a adequação de cada método é determinada com base na diferença média absoluta entre ambas. Os critérios para a seleção do método mais apropriado foram estabelecidos baseando-se nos seguintes critérios:

- Se a diferença média absoluta for inferior a 0,01, ambos os métodos, Pearson e Spearman, são considerados igualmente adequados, indicando a presença de uma forte correlação tanto linear quanto monotônica nos dados.
- Para uma diferença média entre 0,01 e 0,1, os métodos são considerados próximos, sugerindo uma correlação linear e monotônica de intensidade moderada nas variáveis analisadas.
- Uma diferença média entre 0,1 e 0,5 sugere que o coeficiente de Spearman é mais apropriado, indicativo de uma correlação monotônica predominantemente não-linear nos dados.
- Finalmente, uma diferença significativamente grande, superior a 0,5, implica que o coeficiente de Pearson é mais adequado, refletindo a presença de uma forte correlação linear nas variáveis estudadas.

Essa metodologia permite captar tanto relações lineares quanto monotônicas, incluindo padrões não-lineares, possibilitando uma abordagem que permite uma avaliação mais completa, destacando se as variáveis estão relacionadas de forma linear, não-linear ou se não apresentam relação significativa. Além disso, a comparação das matrizes de correlação oferece uma base sólida, uma vez que seleciona o método mais adequado conforme a natureza dos dados, facilitando a interpretação das relações entre as variáveis e tornando a análise mais robusta e assertiva.

Para a análise da correlação entre as variáveis nesta pesquisa, foram adotados critérios uniformes para ambos os métodos - Pearson e Spearman. A força da correlação foi definida conforme os seguintes parâmetros [98]:

- **Correlação Forte:** Valores superiores a 0,7, positivos ou negativos, são considerados indicativos de uma correlação forte. Isso implica na existência de uma relação linear ou monotônica clara e consistente entre as variáveis em análise.
- **Correlação Moderada:** Valores situados entre 0,3 e 0,7, positivos ou negativos, caracterizam uma correlação moderada. Tal nível de correlação sugere a presença de uma relação entre as variáveis, embora esta não seja extremamente intensa.

- **Correlação Fraca:** Valores inferiores a 0,3, positivos ou negativos, indicam uma correlação fraca. Neste caso, qualquer relação existente entre as variáveis é relativamente tênue e, por consequência, não é considerada robusta para fundamentar previsões ou inferências assertivas.
- **Ausência de Correlação:** Um valor próximo de zero denota a falta de correlação linear ou monotônica entre as variáveis estudadas.

Embora os métodos de Pearson e Spearman forneçam uma visão ampla das correlações entre os pares de variáveis, não indicam a principal fonte de variação nos dados, limitando-se a indicar as direções e intensidades das relações. Para complementar os resultados obtidos com esses métodos, e auxiliar na identificação das fontes de variação, utilizou-se o método de análise multivariada de componentes principais (PCA). A PCA consiste em uma técnica de redução de dimensionalidade usada para transformar um conjunto de variáveis possivelmente correlacionadas em um conjunto menor de variáveis não correlacionadas, chamadas componentes principais. O objetivo é capturar a maior parte da variância presente nos dados originais e explicar qual das variáveis representa a maior parte da variância [98].

Na presente pesquisa, aplicou-se a PCA como uma ferramenta para além de simplificar a complexidade dos dados multivariados explicar a fonte de variação das características geométricas, VD ou DBCP, para cada conjunto de VA programada. Este processo foi realizado através dos seguintes passos:

- **Padronização dos Dados:** Inicialmente, os dados são padronizados para ter uma média de zero e um desvio padrão de um. A padronização é crucial para eliminar quaisquer vieses decorrentes de diferentes escalas nas variáveis originais.
- **Cálculo da Matriz de Covariância:** A matriz de covariância é calculada a partir dos dados padronizados. Esta matriz expressa as relações de covariância entre cada par de variáveis no conjunto de dados.

- **Determinação dos Autovalores e Autovetores:** Os autovalores e autovetores da matriz de covariância são calculados. Os autovetores indicam as direções e as cargas dos componentes principais, enquanto os autovalores determinam a magnitude de variação que cada componente principal captura dos dados.
- **Ordenação dos Componentes Principais:** Os componentes principais são ordenados por sua variação (autovalores), do maior para o menor. Isto permite identificar os componentes que capturam a maior parte da variação nos dados.
- **Redução de Dimensionalidade:** Com base na análise dos autovalores, seleciona-se um número de componentes principais que captura a maior parte da variação nos dados, através da variância explicada, que pode ser representado por um gráfico de Pareto. Com isso, reduz-se a dimensionalidade do conjunto de dados original, preservando as características mais significativas.
- **Interpretação dos Componentes Principais:** Por fim, os componentes principais são interpretados e analisados para entender as relações e padrões subjacentes no conjunto de dados. Neste processo, examinou-se qual das variáveis, DBCP ou VD, apresenta a maior carga (valor absoluto) e qual a direção (positiva ou negativa) dessa carga. Isso indica qual variável exerce maior influência sobre a amostra e, também, revela o sentido da variação observada.

Por meio do uso combinado dos coeficientes de correlação de Pearson e Spearman, seguido pela análise aprofundada proporcionada pela PCA, foi possível obter uma compreensão detalhada das relações entre variáveis e identificar as principais fontes de variação nos dados. Essa abordagem holística<sup>3</sup> e multifacetada possibilitou não apenas um entendimento mais claro do processo, mas também forneceu insights valiosos para futuras pesquisas e aplicações práticas no campo em questão.

---

<sup>3</sup> Uma abordagem holística refere-se a um método ou estratégia que considera um sistema ou um problema em sua totalidade, em vez de focar apenas em suas partes individuais. Esta abordagem é baseada no princípio de que todas as partes de um sistema estão interconectadas e que mudanças ou influências em uma parte podem afetar o sistema como um todo.

#### 4.4 DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE CONTROLE DE TEMPERATURA INTERCAMADA

Neste capítulo, serão apresentadas as metodologias utilizadas no desenvolvimento de uma base refrigerada para a célula de manufatura aditiva e um sistema de controle de abertura do arco baseado em um sensor infravermelho.

##### 4.4.1 Influência da temperatura do substrato na geometria do cordão

Para verificação da influência da temperatura do substrato sobre as características físicas e geométricas dos cordões, deposições foram realizadas sobre chapa ao longo de 100 mm, utilizando as velocidades de arame programadas de 4, 5, 6 e 7 m/min, velocidade de deslocamento 45 cm/min e temperaturas do substrato variando em 100, 200, 300 e 500 °C, monitoradas por meio de termopar de contato. Para isto, foi mantido a bancada de experimentos apresentada na Figura 24, arame ER70S-6 de 1,2 mm de diâmetro, mistura gasosa C8 e chapas de aço ASTM A36 com mesmas dimensões descritas no item 4.2. Para aquecimento e manutenção da temperatura do substrato um maçarico oxiacetileno foi utilizado. A Tabela 8 apresenta a matriz de ensaios construída para esta fase.

Tabela 8 – Matriz de experimentos utilizada os verificação da influência da temperatura do substrato.

VA Programada (m/min)	VD (cm/min)	DBCP (mm)	VG (L/min)	Temperatura Substrato (°C)
4,0	45	15	12	100
				200
				300
				500
5,0	45	15	12	100
				200
				300
				500
6,0	45	15	12	100
				200
				300
				500
7,0	45	15	12	100
				200
				300
				500

Fonte: Autor.

Os sinais elétricos, tensão, corrente e velocidade de arame foram aquisitados utilizando o SAP V4.0. Estes sinais foram tratados e condicionados utilizando o software Matlab 2020a. A caracterização geométrica e física foi realizada por meio de macrografia do centro do cordão conforme esquema de corte apresentado na Figura 35 e procedimento apresentado no item 4.2. Além disto, análises estatísticas, utilizando as ferramentas de ANOVA e PCA, foram conduzidas para caracterização dos resultados.

#### **4.4.2 Projeto e desenvolvimento de uma base refrigerada**

Com base na influência significativa que a temperatura intercamada exerce sobre a geometria dos cordões depositados, bem como no tempo de processamento, conforme destacado por Silva et al. [99], e considerando sua importância crucial no processo de manufatura aditiva, optou-se por projetar uma base refrigerada para proporcionar o resfriamento adequado dessas temperaturas.

O projeto da base refrigerada para o posicionador Motopos, foi dividido em duas partes, uma mesa de fixação em aço carbono e um trocador de calor acoplado à esta. Todos os desenhos foram realizados na plataforma CAD Solidworks.

O projeto da mesa baseou-se em mesas comumente utilizadas para a fixação de peças em fresas. Optou-se por utilizar um modelo de mesa que segue o padrão de fixação tipo T, de acordo com a padronização dimensional T14. Essa escolha foi feita para viabilizar a aquisição de dispositivos de fixação de padrões variados, disponíveis comercialmente e de forma acessível. Essa padronização na fixação proporciona maior versatilidade e facilidade na adaptação de diferentes ferramentas e acessórios ao sistema, tornando a mesa refrigerada mais adaptável às necessidades específicas do processo de manufatura aditiva.

O conceito do trocador de calor foi desenvolvido considerando a relação custo x benefício e o tamanho da peça, que é o mesmo tamanho da mesa de fixação. Com esse critério em mente, escolheu-se por projetar um trocador de calor utilizando materiais de alta capacidade de troca térmica, o que resultou em uma composição com base de alumínio e sulcos para a fixação de uma tubulação de cobre. A condução de água no trocador é controlada por um chiller Mecalor modelo MCA-5-RI-220, que permite controlar a vazão e a temperatura da água, conforme detalhado na Tabela 9. Essa abordagem visa otimizar o desempenho térmico do trocador de calor e garantir

uma eficiente dissipação do calor gerado durante o processo de manufatura aditiva, contribuindo para o resfriamento adequado da peça e, conseqüentemente, para a manutenibilidade da geometria dos cordões depositados produzidos.

Tabela 9 – Especificações técnicas refrigerador chiller Mecalor.



**Chiller Mecalor, MCA-5-RI-220**

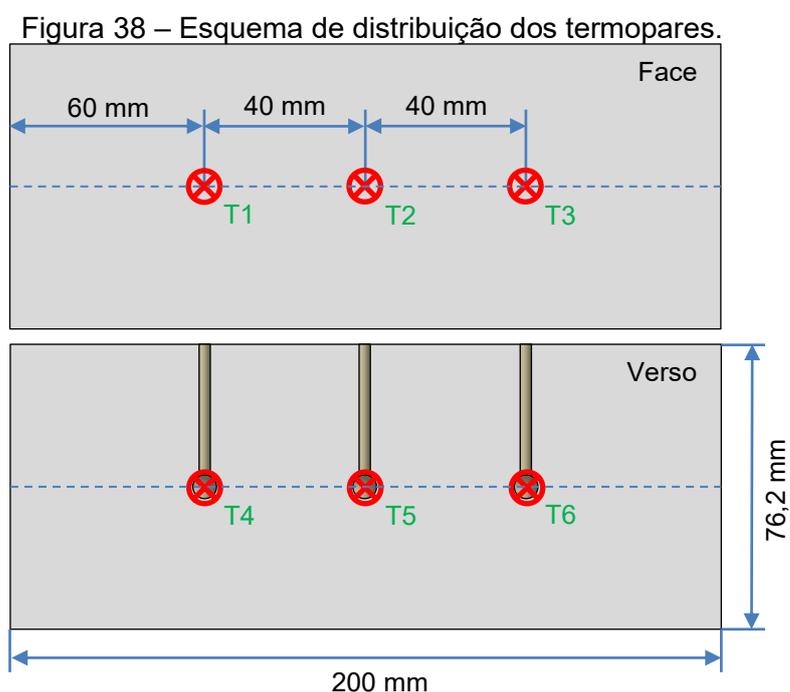
- Potência instalada: 3,8 kVA
- Refrigerante: R410A – 0,7 kg
- Temperatura de trabalho: 5 a 25 °C
- Vazão da bomba 24 L/min @ 30 mca

Fonte: Mecalor [100].

Previamente à fabricação dos sistemas de fixação e refrigeração, realizou-se um estudo utilizando simulação computacional no software COMSOL, com o objetivo de avaliar a capacidade de troca térmica tanto da mesa de fixação quanto da base refrigerada. A simulação permitiu analisar o comportamento térmico dos componentes em diferentes condições de operação, levando em consideração fatores como as propriedades dos materiais utilizados, a geometria dos dispositivos e as condições de fluxo de ar ou água, dependendo do caso. Neste estudo, foi realizada uma simulação de resfriamento de um bloco de aço carbono com dimensões de 200 x 76,2 x 25,4 mm, partindo de uma temperatura inicial de 500 °C e acompanhando sua variação ao longo do tempo. Foram analisados dois cenários distintos: Primeiro, bloco sobre a mesa de fixação e o segundo bloco sobre a base refrigerada com fluxo ativo de água com temperatura inicial de 20°C e vazão de 2,4 L/min.

Por meio das simulações, foi possível obter informações importantes sobre o comportamento térmico do bloco em cada cenário, bem como identificar as diferenças entre as duas abordagens de resfriamento. Os resultados obtidos foram utilizados para aprimorar o projeto dos sistemas de fixação e refrigeração, garantindo uma escolha adequada dos materiais, otimização da geometria dos dispositivos e ajustes nas condições de fluxo de água, de forma a assegurar um resfriamento eficiente. Posteriormente a análise realizada no estudo de simulação, deu-se início ao processo de fabricação dos componentes projetados. A fabricação incluiu tanto a mesa de fixação quanto a base refrigerada, buscando garantir que os dispositivos atendessem às especificações e requisitos estabelecidos durante o projeto.

Em seguida à fabricação dos componentes, experimentos foram realizados sob as mesmas condições simuladas para validar o modelo simulado, bem como verificação da capacidade de trocar calor da base refrigerada. Os experimentos consistiram em monitorar o resfriamento de uma peça de aço carbono A36 de dimensões 200 x 76,2 x 25,4 mm à uma temperatura inicial de 500°C ao longo de 500 segundos, igual ao simulado. Para o monitoramento da temperatura, foi realizado por meio do SAT V4.0 munido de seis termopares tipo K posicionados ao longo da face e do verso da chapa, conforme ilustrado na Figura 38.



Fonte: Autor.

Além do monitoramento por termopares, foi realizada filmagem em infravermelho utilizando uma câmera térmica FLIR T1030SC, detalhada na Tabela 10.

Tabela 10 – Especificações técnicas da câmera FLIR T1030SC.



**Câmera FLIR, T1030SC**

- Sensor: Microbolômetro
- Taxa de aquisição: 120 Hz para máx. resolução
- Resolução máxima: 1024 x 768 px
- Tamanho do Pixel: 17  $\mu\text{m}$
- Faixa de aquisição: a) -10 a 150 °C  
b) 100 a 650 °C  
c) 300 a 2000 °C

Fonte: Flir [101].

A câmera térmica foi acoplada à bancada de experimentos, descrita na Figura 23, e posicionada sobre a base refrigerada conforme mostra a Figura 39, de modo a observar a face superior da peça, bem como da mesa.

Figura 39 – Posicionamento da câmera térmica em relação a peça.



Fonte: Autor.

Foram conduzidos quatro experimentos em dois cenários distintos. No primeiro cenário, utilizou-se apenas a mesa de fixação. No segundo cenário, utilizou-se a base refrigerada com fluxo ativo de água à temperatura de 20°C e vazão de 2,4 L/min. A peça foi fixada no centro da mesa por meio de dois grampos posicionados nos cantos, defasados diagonalmente, conforme mostra a Figura 40.

Figura 40 – Posicionamento e fixação da peça para aquecimento.



Fonte: Autor.

A fixação dos grampos foi feita por meio de um torquímetro de estalo, marca Mitutoyo em duas escalas de torque, 50 N.m e 110 N.m. A Tabela 11, ilustra a matriz de ensaios adotada. Os dados resultantes gerados ao longo deste estudo foram tratados e analisando utilizando o software Matlab R2020a.

Tabela 11 – Matriz de experimentos utilizada para os experimentos de com a mesa refrigerada.

Condição	Temperatura inicial (°C)	Torque (N.m)
Sem Base Refrigerada	500	50
		110
Com Base Refrigerada		50
		110

Fonte: Autor.

#### 4.4.3 Sistema de controle de abertura do arco baseado na temperatura intercamada

A fabricação de peças por manufatura aditiva via soldagem apresenta a necessidade de paradas para resfriamento e, além disso, também apresenta variabilidade no tempo de resfriamento para cada camada depositada ao longo da construção de peças, dependendo da estratégia de deposição. Pensando nisso, um protótipo de um sistema de controle de tempo de parada baseado na temperatura da peça foi desenvolvido para a célula de soldagem alvo de estudo deste trabalho (Figura 23).

Para consecução desse objetivo, um estudo de viabilidade foi inicialmente executado. Neste estudo, inicialmente, investigou-se a forma de comunicação a ser executada com o controlador do robô e quais dispositivos eletrônicos seriam

necessários para isto. Além disso, verificou-se os protocolos de comunicação necessários para a integração tanto dos dispositivos entre si, como dos dispositivos com o controlador do robô. Os dispositivos eletrônicos utilizados nesta fase foram: Um sensor de temperatura infravermelho OMEGA, modelo OS-MINUSB-SN201, uma placa Arduino UNO R3 e um módulo relé. Estes dispositivos foram integrados por meio de um algoritmo desenvolvido em C# a partir da plataforma Visual Studio 2022 da Microsoft. As especificações técnicas dos equipamentos utilizados são apresentadas na Tabela 12. Além disto, analisou-se e projetou-se um suporte para fixação do sensor no braço robótico. Este suporte foi desenhado utilizando uma ferramenta de CAD e fabricando por meio de impressão 3D de polímeros.

Tabela 12 – Especificações técnicas dos equipamentos utilizados no protótipo.

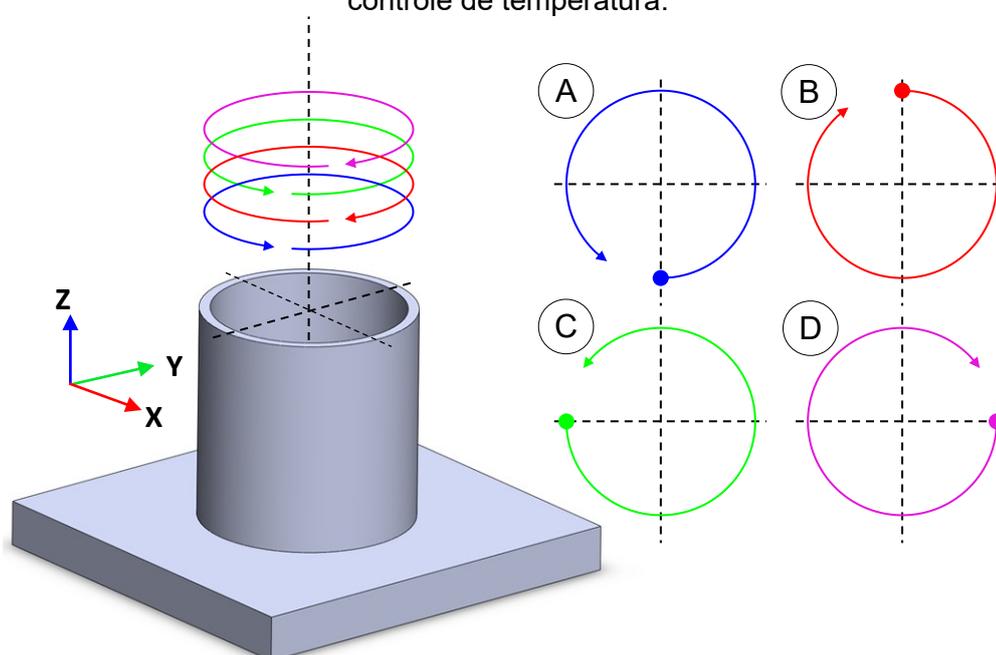
Item	Equipamento	Descrição
a)		<p><b>Sensor de Temperatura OMEGA, OS-MINUSB-SN201</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Sensor: Fotônico</li> <li>• Taxa de aquisição: 8 Hz</li> <li>• Campo de Visão: 20:1</li> <li>• Diâmetro do spot: 36 mm à 500 mm da peça</li> <li>• Faixa de aquisição: -20 a 1000 °C</li> <li>• Dimensões: <math>\varnothing 18</math> mm x 45 mm</li> <li>• Alimentação: 5 VDC (via USB)</li> <li>• Comunicação: Modbus sobre linha serial</li> </ul>
b)		<p><b>Módulo Arduino UNO R3</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Microcontrolador: ATmega328</li> <li>• Velocidade do Clock: 16 MHz</li> <li>• Pinos I/O Digitais: 20(6 podem ser usadas como PWM)</li> <li>• Portas Analógicas: 6</li> <li>• Tensão de Operação: 5 V</li> <li>• Dimensões: 53,4 x 86,6 mm</li> </ul>
c)		<p><b>Módulo Relé, modelo FL-3FF-S-Z</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Tensão de operação: 5 VDC</li> <li>• Permite controlar cargas de até 220V AC</li> <li>• Corrente nominal: 71,4 mA</li> <li>• Pinagem: Normal Aberto, Normal Fechado e Comum</li> <li>• Tensão de saída: 28 VDC a 10A 250VAC a 10A 125VAC a 15A</li> <li>• Tempo de resposta: 5~10ms</li> <li>• Dimensões: 26 mm x 33 mm x 18 mm</li> </ul>

Fonte: Omega [102], Arduino [103] e Ningbo Electron [104].

A validação do sistema foi realizada por meio de um experimento de impressão de um cilindro com diâmetro médio de 60 mm, utilizando 180 camadas, gerando assim 45 paradas em cada quadrante. O incremento entre as camadas foi de

2,3 mm e a temperatura intercamada foi programada para 150 °C. A trajetória adotada dividiu o círculo base em quatro quadrantes defasados em 90°. Para cada camada, o ponto de início e fim foi o mesmo, garantindo uma continuidade na impressão. Além disso, foi programada uma defasagem de 180° em relação ao final da camada anterior, juntamente com a inversão de sentido, alternando entre o movimento horário e anti-horário. Essa abordagem permitiu uma distribuição uniforme e simétrica das camadas ao longo do cilindro. A Figura 41 ilustra esquematicamente o experimento realizado.

Figura 41 – Representação esquemática do experimento de validação do sistema de controle de temperatura.

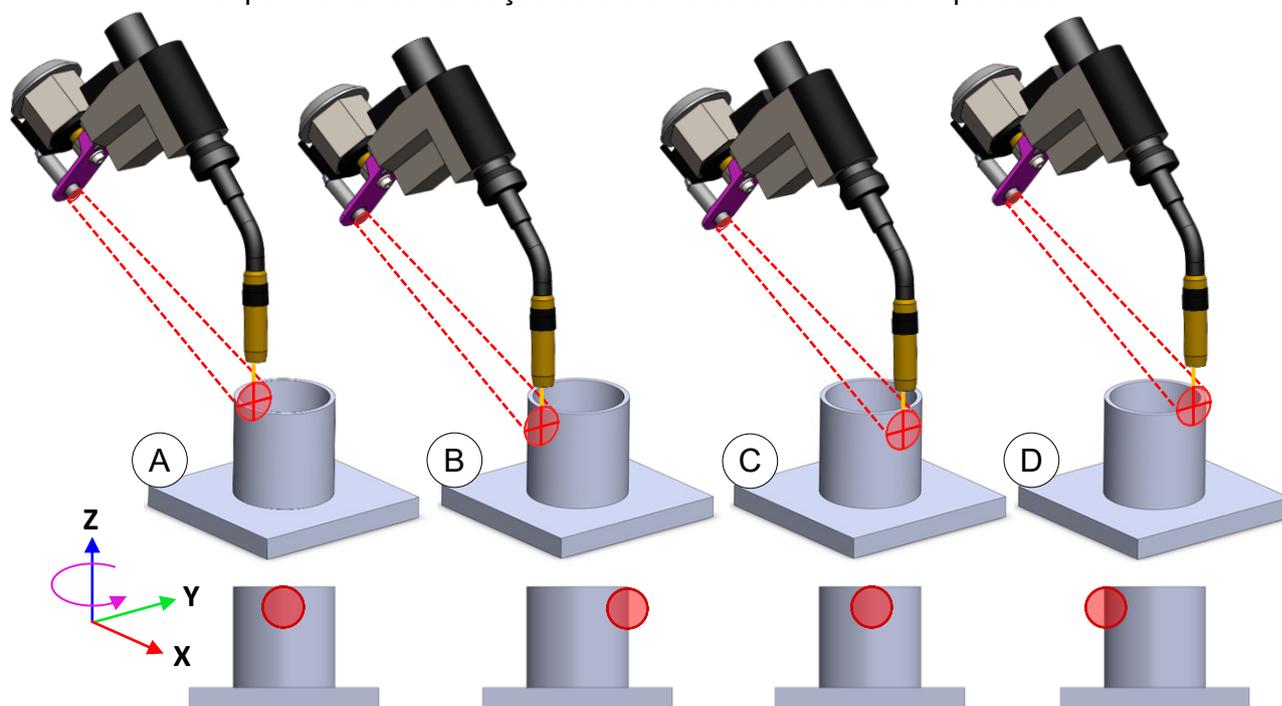


Fonte: Autor.

O experimento permitiu avaliar a capacidade do sensor em diferentes cenários de operação, permitindo ao final de cada camada monitorar a temperatura em cenários como: A leitura frontal com o sensor posicionado em frente à peça, a leitura lateral com o sensor captando apenas metade de uma seção e a leitura sobreposta com a presença de um obstáculo próximo e dentro do campo de visão. Durante o experimento, a posição da tocha de soldagem foi mantida perpendicular ao substrato, enquanto o campo de visão do sensor permaneceu paralelo ao eixo de deslocamento Y, garantindo assim um plano de medição paralelo ao campo de visão do sensor, porém inclinado em 37°, o que mitiga a interferência de obstáculos e possibilita a

medição de peças multifacetadas. A Figura 42 ilustra esquematicamente os diferentes cenários experimentados durante este ensaio.

Figura 42 – Representação esquemática dos cenários de medição adotados para o experimento de validação do sistema de controle de temperatura.



Fonte: Autor.

O monitoramento da temperatura durante o experimento foi realizado com o uso do sensor de temperatura em conjunto com um termopar de contato tipo K. O valor de temperatura registrado foi o primeiro valor abaixo da temperatura de referência estabelecida. O sensor foi configurado para ler a temperatura máxima alcançada dentro de um período de amostragem de um segundo.

Além do monitoramento da temperatura, também foi realizada a avaliação da altura média de cada camada depositada. Para isso, foram realizadas quatro medições em cada camada, uma em cada quadrante, utilizando um paquímetro digital Mitutoyo com uma resolução de 0,01 mm. O método adotado para a medição consistiu em obter a altura do cilindro e subtrair a altura da camada anterior, conforme a equação (18).

$$\bar{A}_c = \bar{A}_i - \bar{A}_{i-1} \quad (18)$$

Onde:

$A_c$  = Altura média da camada (mm);

$A_i$  = Altura média atual do cilindro (mm);

$A_{i-1}$  = Altura média anterior do cilindro (mm).

Com base nos resultados obtidos, foi possível realizar uma análise detalhada do desempenho do sistema de controle de temperatura e sua influência no controle da geometria do cordão de solda.

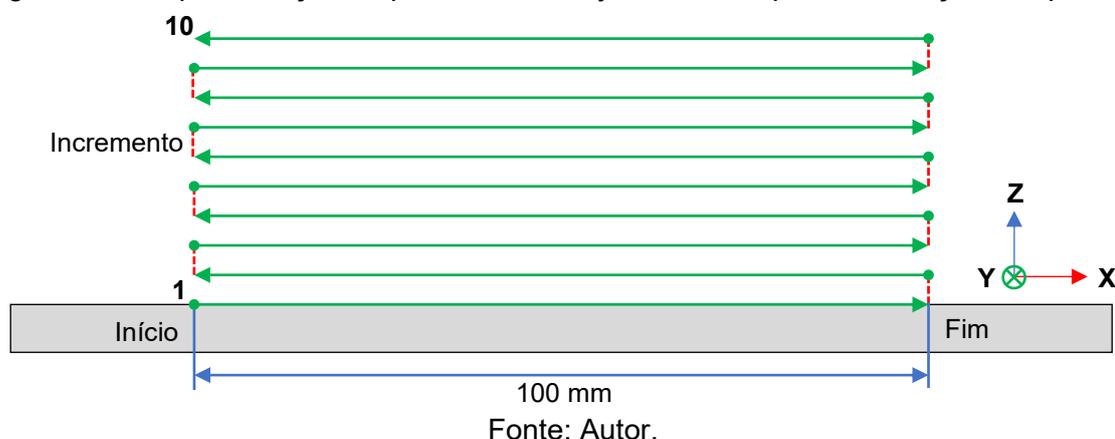
#### 4.5 CONCEPÇÃO DE DIRETRIZES PARA PREDIÇÃO DE PARÂMETROS NA MANUFATURA ADITIVA

Neste capítulo, serão exploradas as diretrizes operacionais, às quais serão base para a concepção e desenvolvimento de um algoritmo, destinado à predição e à parametrização dos diversos parâmetros envolvidos no processo de manufatura aditiva.

##### 4.5.1 Desenvolvimento de diretrizes para sobreposição vertical

Para o desenvolvimento do algoritmo de sobreposição vertical inicialmente realizou-se a fabricação de paredes de 100 mm de comprimento, passe único e com 10 camadas de altura, utilizando a bancada de experimentos e instrumentação apresentada na Figura 24, arame de aço ER70S-6 de 1,2 mm de diâmetro, mistura gasosa C8 e chapas de aço carbono ASTM A36 com mesmas dimensões descritas no item 4.2. A trajetória utilizada para deposição das camadas foi do tipo bidirecional ou *Raster* no plano XZ, descrita no esquema da Figura 43.

Figura 43 – Representação esquemática da trajetória utilizada para construção das paredes.



Nesta fase, dentre outros parâmetros, manteve-se, principalmente, a DBCP controlada em 15 mm e a temperatura intercamada em 100 °C, monitoradas por meio de calibre de altura e um termopar de contato. Os experimentos concentraram-se em verificar a altura média do cordão camada a camada para uma determinada faixa de alimentação de arame e velocidade de deslocamento. Sendo assim, para a matriz de ensaios, variou-se a velocidade de arame programada entre 4,0 e 7,0 m/min utilizando a variante CMT versão 2.3.8.5. Além disso, variou-se em paralelo a velocidade

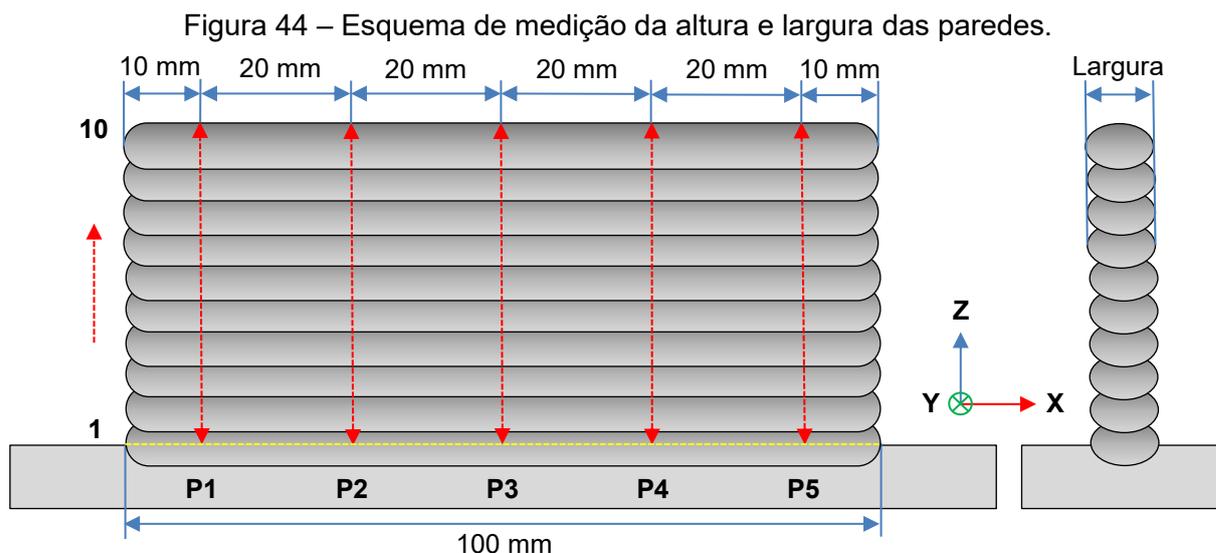
soldagem entre 30 e 75 cm/min. A Tabela 13 apresenta a matriz de ensaios construída para esta fase.

Tabela 13 – Matriz de experimentos utilizada para a construção das paredes.

VA Programada (m/min)	VD (cm/min)	VD (mm/s)	DBCP (mm)	VG (L/min)	Temperatura Intercamada (°C)
4,0	30	5,0	15	12	100
	45	7,5			
	60	10,0			
	75	12,5			
5,0	30	5,0	15	12	100
	45	7,5			
	60	10,0			
	75	12,5			
6,0	30	5,0	15	12	100
	45	7,5			
	60	10,0			
	75	12,5			
7,0	30	5,0	15	12	100
	45	7,5			
	60	10,0			
	75	12,5			

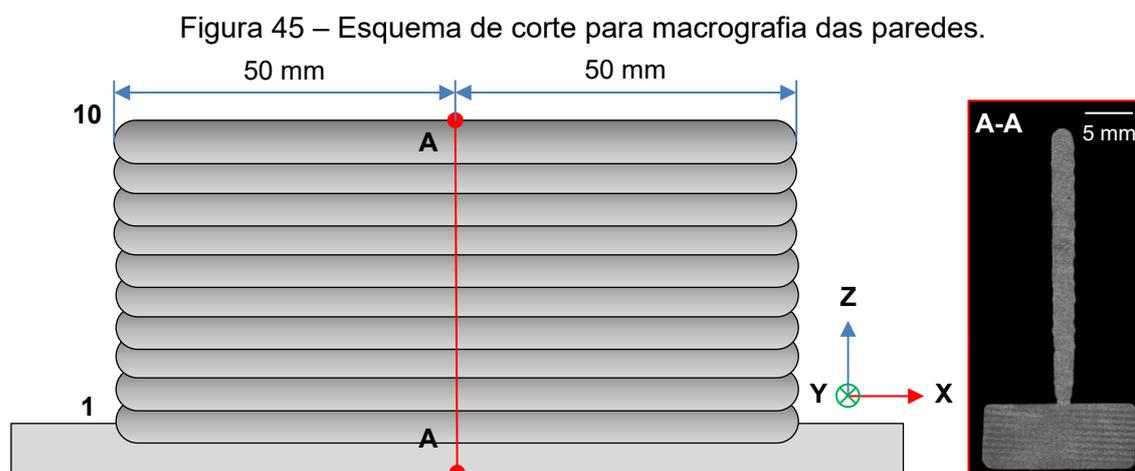
Fonte: Autor.

Os sinais elétricos, tensão, corrente e velocidade de arame foram adquiridos utilizando o SAP V4.0. Estes sinais foram tratados e condicionados utilizando o software Matlab R2020a. Para a caracterização geométrica da parede foi utilizado um paquímetro mitutoyo digital com resolução de 0,01 mm. Os mensurandos foram a altura e largura máxima, obtidos por meio da média de 5 pontos distribuídos ao longo da parede, conforme esquema de medição da Figura 44.



Fonte: Autor.

Macrografias das paredes foram feitas para avaliar o incremento camada a camada e observar o comportamento do entrelaçamento entre cordões, para desse modo desenvolver uma estratégia de previsão de altura de camada. As macrografias foram realizadas no centro da seção longitudinal da parede de acordo com o esquema da Figura 45, utilizado o procedimento descrito no item 4.2. Para o registro das macrografias, foram utilizados os equipamentos descritos na Tabela 6.



Fonte: Autor.

A partir desses dados um algoritmo foi desenvolvido para previsão da altura da camada, ou seja, do incremento necessário para manter a DBCP programada para a parametrização selecionada.

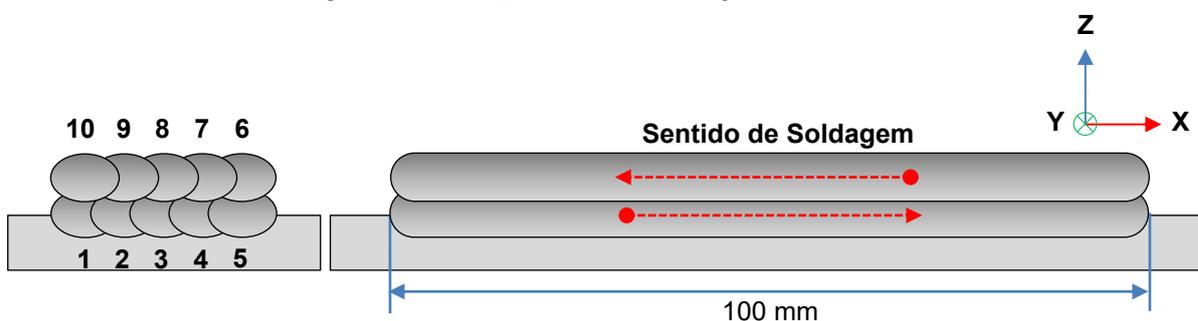
#### 4.5.2 Desenvolvimento de diretrizes para sobreposição horizontal

Nesta etapa, previamente aos experimentos modelou-se algoritmos de sobreposição horizontal. O algoritmo desenvolvido levou em consideração modelos descritos na literatura, por exemplo, o modelo descrito por Ding, et al. [14] que apresenta um modelo baseado em seno e cosseno utilizando como entrada de dados a altura e largura do cordão, os modelos descritos por Suryakumara, et al., [71] e Xiong, et al., [79, 105] que apresentam um modelo matemático de sobreposição também baseado na altura e largura do cordão, porém utilizando polinômios de segundo grau.

Em resumo, os algoritmos utilizam relações de igualdade de área sobrepostas para definir uma distância entre o centro dos cordões (*Overlap*). Observando os modelos dos autores citados bem como suas limitações criou-se outra abordagem abordagens, que utiliza a altura e largura do reforço do cordão de solda como entrada de dados e uma análise de regressão baseada em polinômios de segunda ordem. A resposta do método é a distância entre os centros dos cordões.

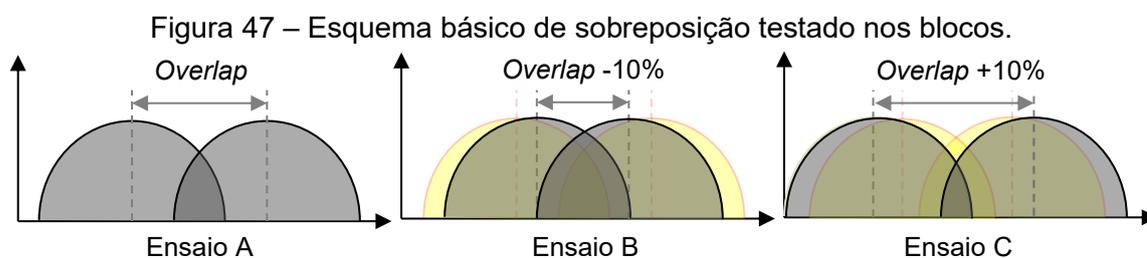
A partir do algoritmo de sobreposição, dos dados do mapeamento do processo, da bancada de experimentos apresentada na Figura 24, bem como dos materiais (arame, substrato e mistura gasosa C8), sendo estes os mesmo descritos no item 4.2, foram construídos blocos com cinco sobreposições horizontais ao longo de duas camadas defasadas  $180^\circ$ , ou seja, iniciando a camada 2 no fim da camada 1, conforme esquema na Figura 46.

Figura 46 – Esquema de fabricação dos blocos.



Fonte: Autor.

Para verificar a assertividade dos métodos de sobreposição horizontal foi extrapolado o valor calculado para o *Overlap* em -10% e +10%, de acordo com o esquema básico apresentado na Figura 47. Em casos particulares o valor variou para mais ou para menos até se obter uma condição visual satisfatória.



Fonte: Autor.

Além da variação do *Overlap*, considerou-se na matriz de experimentos a variação da velocidade de arame programada entre 4,0 e 7,0 m/min utilizando a variante CMT versão 2.3.8.5. variou-se também a velocidade soldagem entre 30 e 75 cm/min, possibilitando assim o mapeamento não só da variação da sobreposição, mas também a influência de cada parâmetro sobre ela. A Tabela 14 apresenta a matriz de ensaios construída para esta fase.

Tabela 14 – Matriz de experimentos utilizada nos ensaios de sobreposição horizontal.

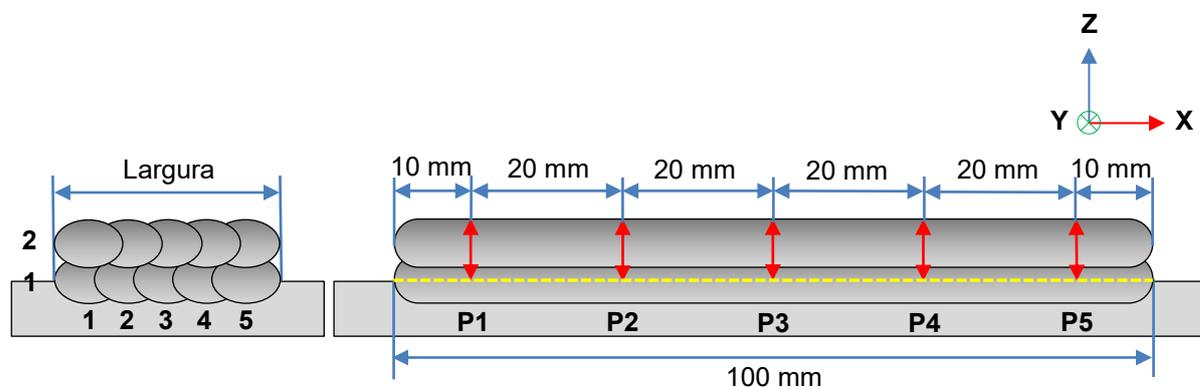
VA Programada (m/min)	VD (cm/min)	VD (mm/s)	Overlap* (mm)			DBCP (mm)	VG (L/min)	Temperatura interpasse (°C)
			-10%	0	+10%			
4,0	30	5,0	3,88	4,31	4,75	15	12	100
	45	7,5	3,19	3,54	3,90			
	60	10,0	2,74	3,05	3,35			
	75	12,5	2,45	2,72	2,99			
5,0	30	5,0	4,59	5,10	5,62	15	12	100
	45	7,5	4,04	4,49	4,94			
	60	10,0	3,56	3,96	4,36			
	75	12,5	3,22	3,58	3,94			
6,0	30	5,0	5,06	5,62	6,19	15	12	100
	45	7,5	4,44	4,94	5,43			
	60	10,0	3,69	4,10	4,58			
	75	12,5	3,51	3,90	4,30			
7,0	30	5,0	5,35	5,94	6,54	15	12	100
	45	7,5	4,83	5,36	4,83			
	60	10,0	4,17	4,64	5,10			
	75	12,5	3,79	4,21	4,63			

\*Função do valor da largura e altura do cordão simples.

Os sinais elétricos, tensão, corrente e velocidade de arame foram adquiridos utilizando o SAP V4.0, estes sinais foram tratados e condicionados utilizando o software Matlab R2020a.

Para a caracterização geométrica da parede foi utilizado um paquímetro mitutoyo digital com resolução de 0,01 mm. O principal mensurando foi a largura média do bloco, por meio da medição de 5 regiões ao longo do bloco, conforme mostra o esquema na Figura 48.

Figura 48 – Esquema de medição da largura e altura dos blocos.



Fonte: Autor.

Adicionalmente às medições mencionadas, foram conduzidos ensaios de raio-X para verificar a presença de defeitos, como sobreposição incompleta e porosidade. Para isto, utilizou-se o sistema detalhado na Tabela 15.

Tabela 15 – Especificações técnicas do sistema de inspeção por raio-x.

Equipamento	Descrição
	<p><b>Gerador de Raio-X industrial Eresco 65 MF4</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Potência máxima: 900 W</li> <li>• Faixa de alta tensão: 5 – 300 kV</li> <li>• Faixa de corrente: 0,5 – 6 mA</li> <li>• Material do anodo: Tungstênio (W)</li> <li>• Ângulo de visão: 20°</li> <li>• Penetração no aço: 65 mm em 10 min</li> </ul>
	<p><b>Raio-X computadorizado Carestream Industrex HPX-1 Plus</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Níveis de cinza (brilho): 16 bits linear e 12 bits log</li> <li>• Tamanho do pixel: 25 µm</li> <li>• Resolução espacial: 50 µm</li> <li>• Tipo de placa: Flexível de fósforo</li> <li>• Tamanho da placa: 30 x 25 cm</li> </ul>

Fonte: Waygate Technologies [106] e CarestreamNDT [107].

A partir desses dados uma análise completa sobre o algoritmo foi executada para correção e implementação de melhorias que garantam acurácia ao método.

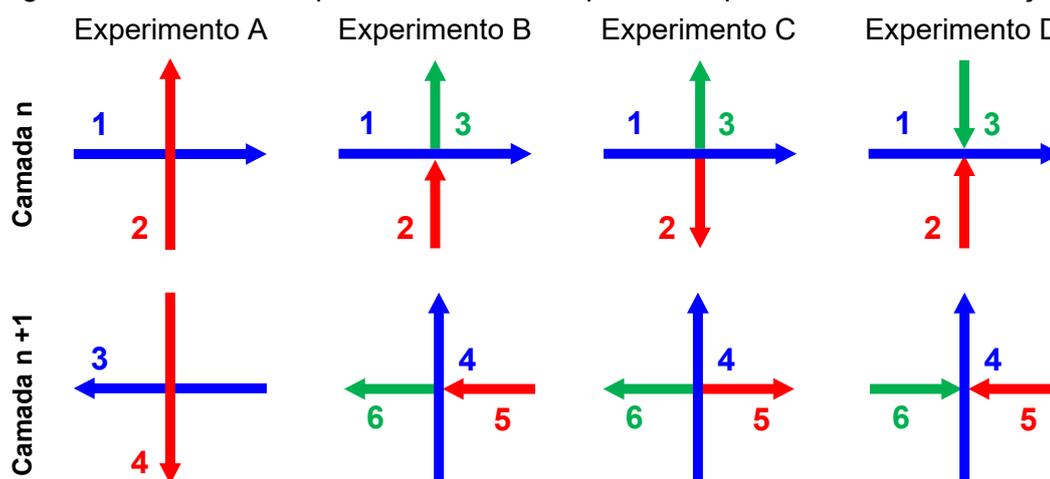
#### 4.5.3 Avaliação de estratégias para intersecção entre cordões

Nesta etapa, serão avaliadas diferentes estratégias de intersecção entre o cruzamento de dois ou mais cordões depositados. O objetivo é verificar a influência de diferentes modos de intersecção e definir a estratégia que promova menor desvio geométrico no ponto de intersecção.

Para consecução desse objetivo criou-se uma matriz de ensaios que atendesse todas as possibilidades de intersecção para um caso em que a defasagem entre os cordões depositados interseccionados fosse um ângulo reto, análogo à metodologia descrita por Sousa, et al. [75]. Sendo assim, a matriz de ensaios construída é composta por quatro experimentos, conforme descrito no esquema da Figura 49. Para o experimento A foi considerada uma intersecção direta, já para os experimentos B, C e D foi incluída uma parada, de modo que o fim e o início do cordão de intersecção sobrepusessem o cordão base com uma distância do seu respectivo centro igual a calculada pelo algoritmo de sobreposição horizontal. Entretanto, para o

experimento B o fim do primeiro trecho do cordão de intersecção termina sobrepondo o cordão base e o segundo trecho do cordão de intersecção inicia sobrepondo o cordão o base. Para o experimento C ambos os trechos do cordão de intersecção iniciam sobrepondo o cordão base e para o experimento D ambos os trechos do cordão de intersecção terminam sobrepondo o cordão base.

Figura 49 – Matriz de experimentos utilizada para os experimentos de intersecção.



Fonte: Autor.

Para os experimentos práticos foi considerada a deposição de cordões de 80 mm de comprimento, com 10 camadas de altura, utilizando a bancada de experimentos e instrumentação apresentada na Figura 24, arame de aço ER70S-6 de 1,2 mm de diâmetro, mistura gasosa C8 e chapas de aço carbono ASTM A36 com 12,7 x 150 x 150 mm. Para os parâmetros de soldagem foi utilizada uma velocidade de arame de 6 m/min, DBCP de 15 mm e velocidade de deslocamento de 60 cm/min. Os sinais de soldagem adquiridos foram tratados e condicionados utilizando o software Matlab R2020a.

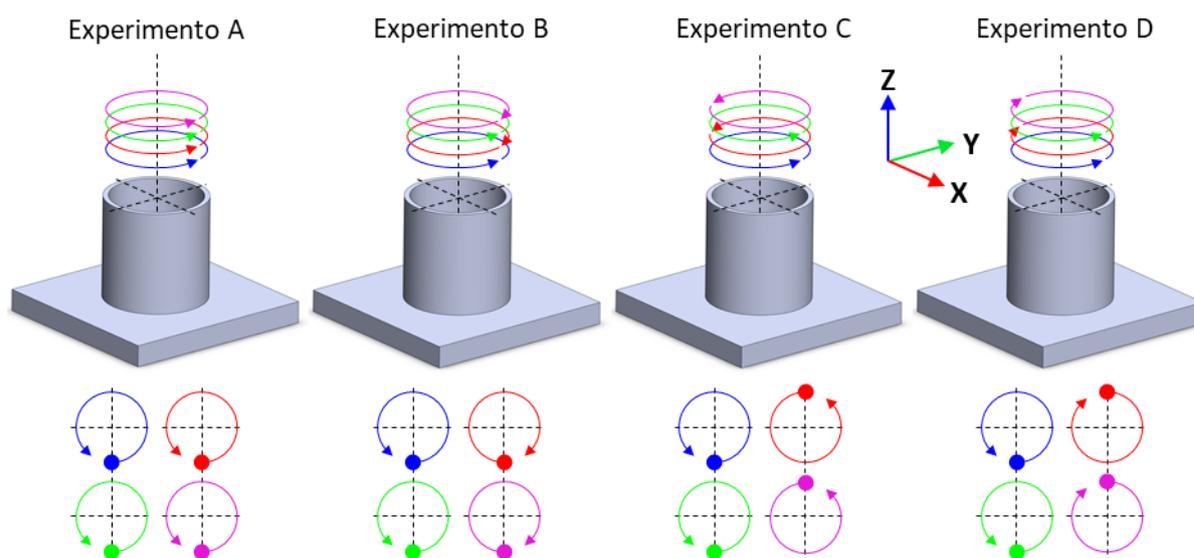
#### 4.5.4 Avaliação de estratégias de conexão entre cordões e geometrias triangulares

Na manufatura aditiva, outro parâmetro importante são as estratégias de conexão de início e fim de cordão de solda, especialmente para fabricação de geometrias fechadas. Neste sentido, foi realizado um estudo de diferentes estratégias de conexão de início e fim de cordão para duas formas geométricas, cilindro e cubo.

Para os experimentos práticos foi considerada a deposição de cilindros e cubos com raio de 30 mm e lado de 60 mm, com 10 camadas de altura, utilizando a bancada de experimentos e instrumentação apresentada na Figura 24, arame de aço ER70S6 de 1,2 mm de diâmetro, mistura gasosa C8 e chapas de aço carbono ASTM A36 com 12,7 x 150 x 150 mm. Para os parâmetros de soldagem foi utilizada uma velocidade de arame de 6 m/min, DBCP de 15 mm e velocidade de deslocamento de 60 cm/min.

Nos experimentos envolvendo a geometria cilíndrica, foram exploradas quatro variações de trajetória, conforme mostra a Figura 50. No experimento A, todas as camadas foram depositadas na mesma direção de soldagem (sentido horário) e tiveram início e término do cordão no mesmo ponto. Para o experimento B, todas as camadas tiveram início e término do cordão no mesmo ponto, mas com inversão de sentido entre horário para as camadas ímpares e anti-horário para as camadas pares. No experimento C, todas as camadas foram depositadas na mesma direção de soldagem (sentido horário), porém as camadas pares foram defasadas 180° das ímpares. Para o experimento D, as camadas ímpares foram depositadas no sentido horário e defasadas 180° das camadas pares, as quais foram depositadas no sentido anti-horário.

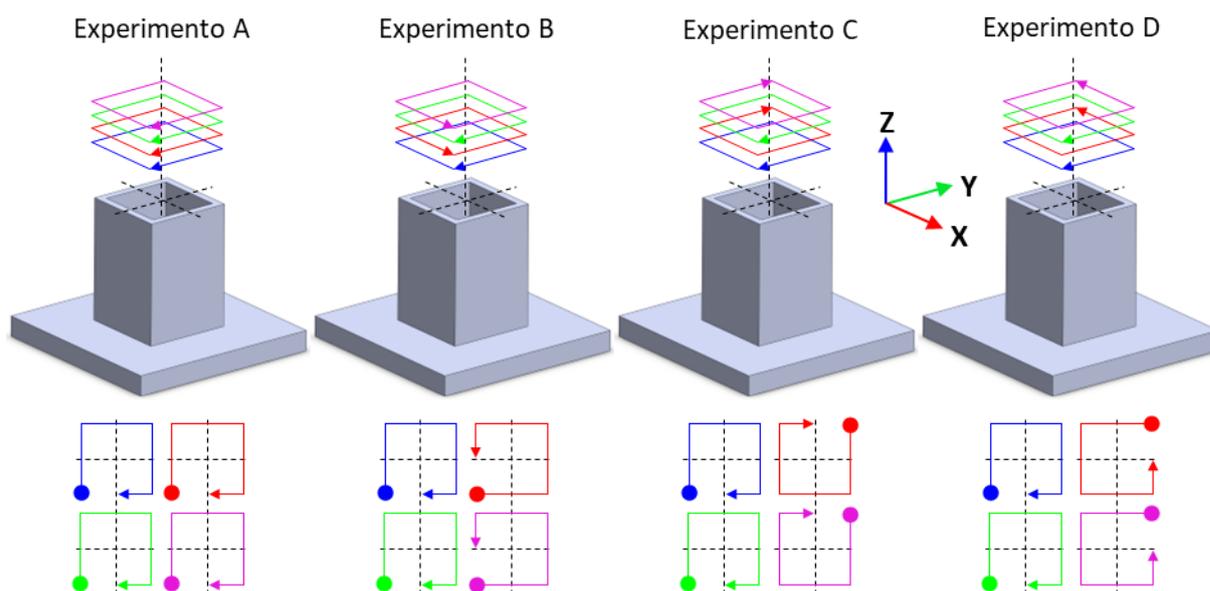
Figura 50 – Esquema de deposição dos cilindros para as diferentes estratégias de conexão dos cordões.



Fonte: Autor.

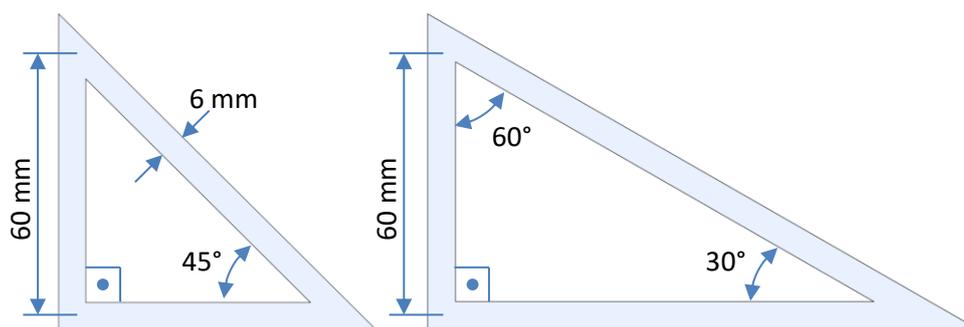
Para os experimentos envolvendo a geometria cúbica também foram exploradas quatro variações de trajetória semelhantes ao anterior, conforme mostra a Figura 51. Para o experimento A, todas as camadas foram depositadas na mesma direção de soldagem (sentido horário) e tiveram início e término do cordão no mesmo ponto que neste caso foram no vértice do quadrado que compõem o cubo. No experimento B, todas as camadas tiveram início e término do cordão no mesmo ponto, mas com inversão de sentido entre horário para as camadas ímpares e anti-horário para as camadas pares. Para o experimento C, todas as camadas foram depositadas na direção de soldagem (sentido horário), porém as camadas pares foram defasadas  $180^\circ$  das ímpares. No experimento D, as camadas ímpares foram depositadas no sentido horário e defasadas  $180^\circ$  das camadas pares, as quais foram depositadas no sentido anti-horário.

Figura 51 – Esquema de deposição dos cubos para as diferentes estratégias de conexão dos cordões.



Além dos experimentos variando as estratégias de conexão, foram conduzidos experimentos envolvendo a deposição de duas peças com formato triangular, variando os ângulos em 30, 45, 60 e 90 graus, conforme mostra a Figura 52. Para cada configuração angular, foram depositadas 10 camadas utilizando a trajetória estabelecida no experimento D. Essa abordagem permitiu explorar diferentes as geometrias triangulares e avaliar a influência dos ângulos na qualidade da deposição.

Figura 52 – Dimensões dos triângulos depositados variando os ângulos.



Fonte: Autor.

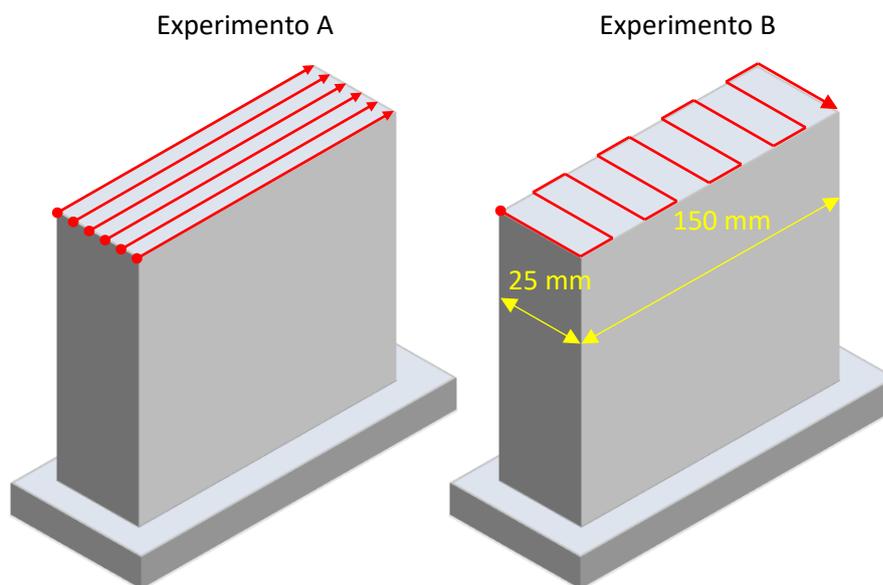
A partir da deposição destas peças realizou-se a análise geométrica observando as conexões entre os cordões, a retilinearidade das peças e coesão entre as camadas. Com isto, foi possível definir o padrão de conexão e trajetória que oferece a melhor geometria para a peça final.

#### 4.5.5 Avaliação e comparação de diferentes trajetórias de deposição

Para avaliar a influência da trajetória sobre a fabricação de peças, foi realizado um estudo utilizando duas condições distintas: sobreposição de cordões e tecimento, conforme esquematizado na Figura 53. Utilizando a bancada de experimentos e instrumentação apresentada na Figura 24, arame de aço ER70S6 de 1,2 mm de diâmetro, mistura gasosa C8 e chapas de aço carbono ASTM A36, foram produzidas paredes com 150 mm comprimento e 25 mm espessura com 15 camadas de altura. Os parâmetros de soldagem utilizados para esses experimentos foram baseados na saída do algoritmo de predição. Dessa forma, foi empregada uma VA programada de 6 m/min e VD de 60 cm/min. Para as paredes com sobreposição, foram realizadas 5 sobreposições, totalizando 6 cordões, a uma distância entre centros de cordões de 4,4 mm. No caso do tecimento, empregou-se o modo retangular com a mesma VD e sobreposição do experimento anterior. Estas paredes foram inspecionadas visualmente, mensuradas e utilizadas para realização de macrografias.

Adicionalmente, foram fabricadas quatro paredes, duas com sobreposição e duas com tecimento, cada uma com 150 mm de comprimento, 150 mm de altura e 25 mm de espessura, destinadas a extração de corpos de prova de tração para verificação de algumas propriedades mecânicas em função da trajetória.

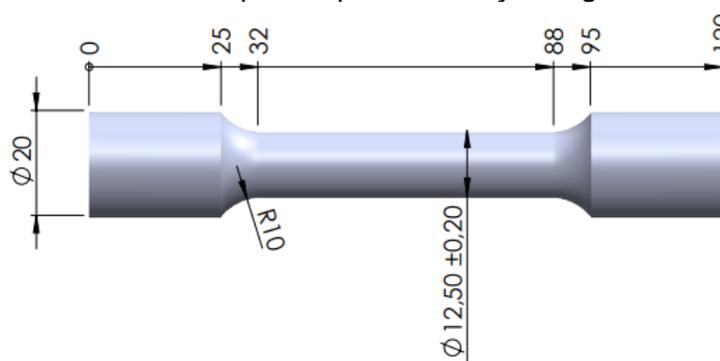
Figura 53 – Representação esquemática das trajetórias adotadas para fabricação das paredes.



Fonte: Autor.

A partir destas paredes, foram extraídos três corpos de prova de tração de cada parede. A Figura 54 apresenta a geometria dos corpos de prova extraídos, fabricados segundo as dimensões recomendadas pela norma ASTM E8.

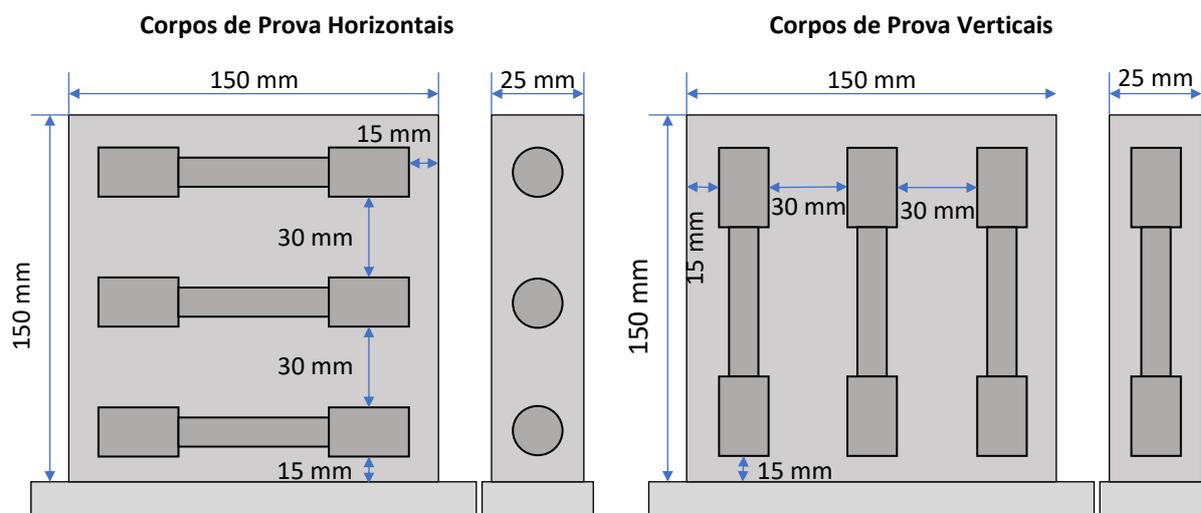
Figura 54 – Dimensões dos corpos de prova de tração segundo a norma ASTM E8



Fonte: Autor.

Os corpos de prova foram extraídos em duas direções, horizontal e vertical, conforme mostra o esquema da Figura 55.

Figura 55 – Esquema de extração dos corpos de prova das paredes.



Fonte: Autor.

A análise dos resultados dos ensaios concentrou-se nas propriedades mecânicas de limite de escoamento, resistência máxima, alongamento, módulo de resiliência e tenacidade. Adicionalmente, foi realizada a verificação de possíveis diferenças anisotrópicas entre as direções de extração dos corpos de prova para cada modelo de trajetória. Para determinar as propriedades de resiliência e tenacidade, calculou-se, por integrais, a área abaixo do gráfico da região elástica e a área total abaixo do gráfico, conforme mostram as equações (21) e (22). Os resultados desses testes foram analisados por meio de testes estatísticos, como a análise de variância, visando uma compreensão mais profunda e abrangente das variações observadas.

$$U_r = \int_0^{\varepsilon_e} \sigma d\varepsilon \quad (19)$$

$$U = \int_0^{\varepsilon_t} \sigma d\varepsilon \quad (20)$$

Onde:

 $U_r$  = Módulo de resiliência (J/m<sup>3</sup>); $U$  = Tenacidade (J/m<sup>3</sup>); $\sigma$  = Tensão (MPa); $\varepsilon_e$  = Deformação até o limite escoamento (mm/mm); $\varepsilon_t$  = Deformação total na ruptura (mm/mm); $\varepsilon$  = Deformação (mm/mm);

#### 4.6 CONCEPÇÃO, DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO DE ALGORITMO DE PREDIÇÃO DE PARÂMETROS PARA MANUFATURA ADITIVA

A concepção do algoritmo de predição de parâmetros para manufatura aditiva teve como base todos os estudos práticos realizados ao longo deste trabalho. Portanto, a base de conhecimento deste algoritmo são os parâmetros de soldagem mapeados durante os estudos aprofundados realizados sobre a variante CMT.

O sistema foi concebido para operar em uma lógica análoga a um sistema especialista, capaz de realizar processos de inferência lógica para chegar a conclusões ou tomar decisões baseadas em regras e informações disponíveis. Em outras palavras, o sistema utiliza regras lógicas e dados para deduzir novas informações ou realizar ações específicas baseadas em uma entrada que neste caso é a espessura da parede da peça.

O sistema a partir desta entrada, executa a máquina de inferências e a partir das regras criadas ao longo dos resultados gerados nos experimentos práticos define as melhores saídas, isto é, os parâmetros de soldagem, VA programada e VD, incremento vertical e número de sobreposições horizontais, além da estratégia de deposição, ou seja, a trajetória. Todas estas variáveis são cruciais para a programação da trajetória no software de CAM SprutCAM XV. Além disso, vale salientar que todas as regras e condições foram implementadas utilizando o software Matlab 2020a.

Para conceber e desenvolver o algoritmo, bem como a máquina de inferência, todos os resultados obtidos ao longo do trabalho foram compilados em um banco de dados. Esse banco incluiu regras e condições que orientaram decisões assertivas na definição das diretrizes e parâmetros de soldagem. Isso abrangeu desde a composição da mistura gasosa para o arame de aço ER70S-6 até os detalhes operacionais como DBCP, faixa operacional (VA e VD), incrementos verticais e horizontais, modos de intersecção, modos de conexão e tipo de trajetória.

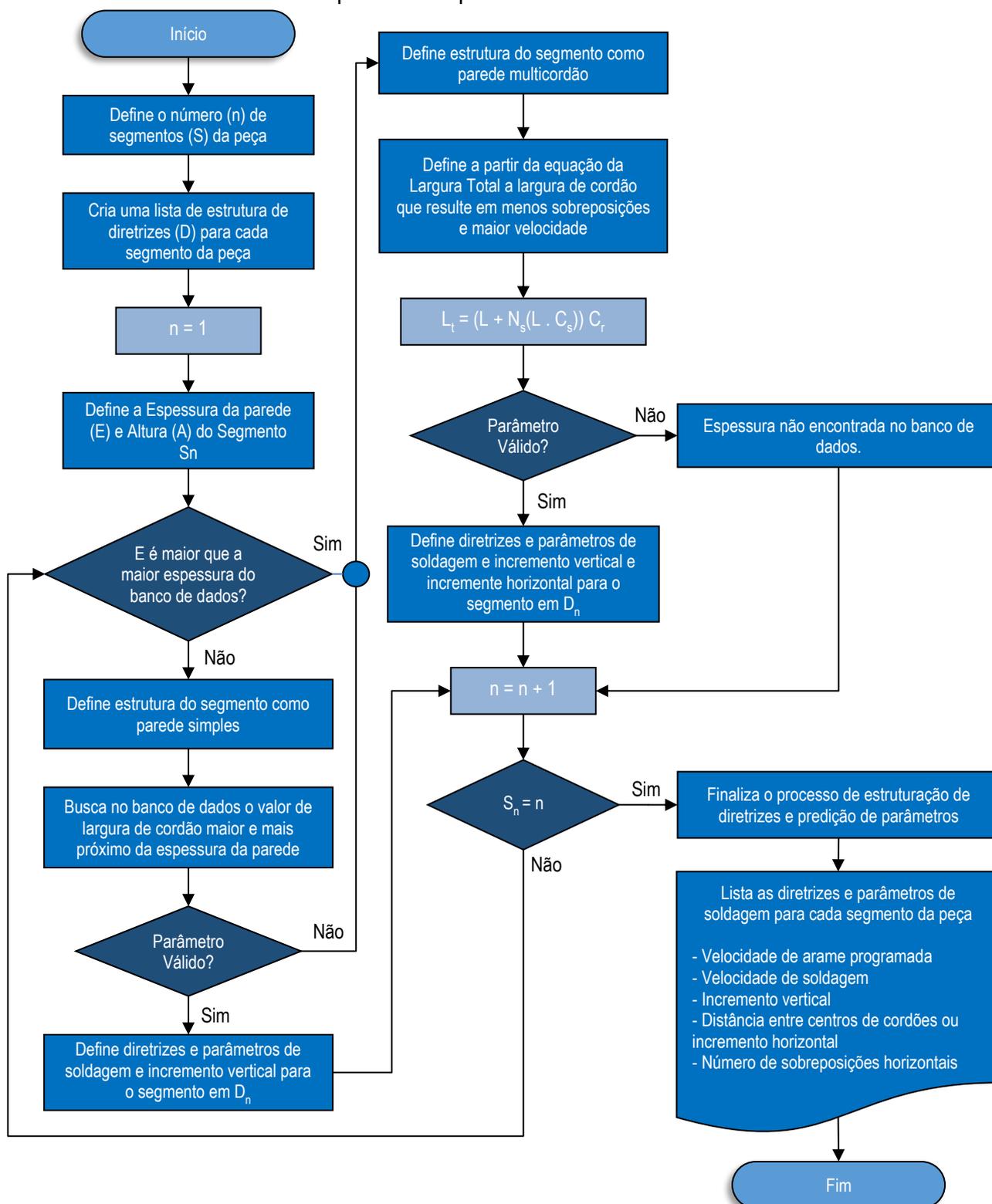
O algoritmo, delineado no fluxograma da Figura 56, inicia seu processo recebendo informações sobre a peça a ser fabricada como entrada de dados. Em uma etapa inicial de avaliação, a peça é examinada para identificar ressaltos, detalhes ou variações na espessura da parede. Caso tais características estejam presentes, a peça é segmentada em partes distintas, cada uma associada a uma lista específica

de diretrizes e parâmetros. Essa segmentação é essencial para garantir um controle preciso e eficaz durante o processo de fabricação.

Em seguida, cada segmento é caracterizado conforme sua espessura de parede. Se a espessura exceder o maior valor de largura de cordão registrado no banco de dados, o algoritmo identifica o segmento como uma parede espessa e emprega o método de sobreposição de cordões, conforme definido pela equação da sobreposição. Caso contrário, o segmento é considerado uma parede simples, e o algoritmo busca no banco de dados o valor de espessura mais próximo. Em ambos os casos, o algoritmo prioriza a velocidade de deslocamento e, em seguida, a velocidade de alimentação. O algoritmo inicialmente seleciona três opções de maior velocidade de alimentação e seleciona aquela com a maior velocidade de deslocamento. Caso o algoritmo não encontre um parâmetro adequado para uma parede simples, ele automaticamente considera a peça como uma parede espessa. Utilizando a equação da sobreposição, o algoritmo busca então um conjunto de parâmetros apropriados para esse tipo de parede. Se, mesmo assim, não for possível encontrar uma solução que atenda aos requisitos, o algoritmo sinaliza um erro e solicita que o usuário redefina a espessura da peça. Esse procedimento garante que o processo de fabricação seja conduzido de forma precisa e eficiente, evitando a utilização de parâmetros inadequados que possam comprometer a qualidade da peça final.

Por fim, após a parametrização de todos os segmentos o algoritmo compila uma lista contendo as diretrizes e parâmetros para cada segmento da peça. Esses dados são então utilizados no software CAM como parâmetros de trajetória para o modelo CAD a ser fabricado.

Figura 56 – Fluxograma do funcionamento do algoritmo de predição de diretrizes e parâmetros para manufatura aditiva.

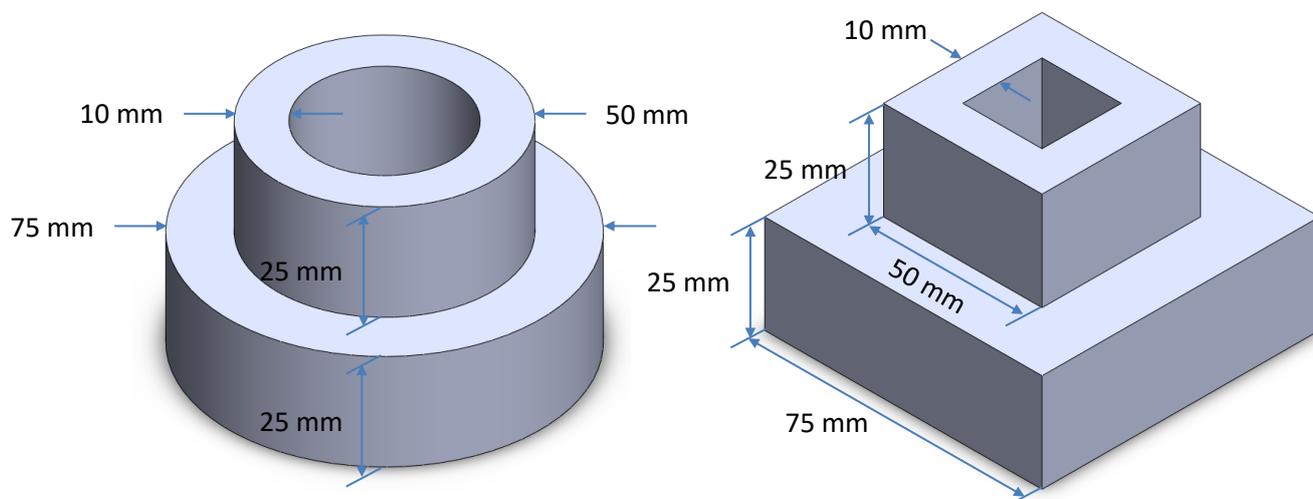


Fonte: Autor.

Na etapa de validação do algoritmo de predição de parâmetros proposto, utilizando a bancada de experimentos descrita na Figura 24, foram fabricadas diferentes peças representativas para avaliar a eficácia do modelo. Essas peças abrangem diferentes geometrias e características, incluindo um cilindro com ressalto, um cubo com ressalto, dois tubos de parede simples com derivações e o logo do LABSOLDA em parede simples, conforme mostram a Figura 57, Figura 58, Figura 59 e Figura 60.

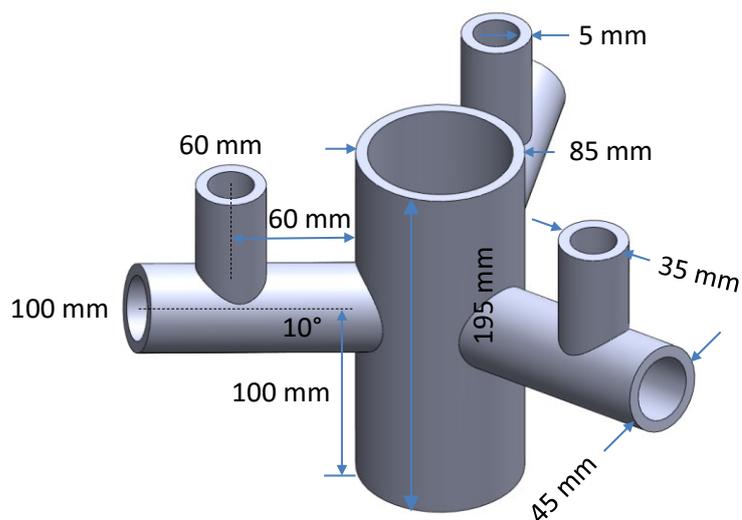
Como estratégia de deposição, a tocha de soldagem foi mantida perpendicular à poça de fusão em todos os casos. Para os tubos com derivações em direções angulares, recorreu-se à mesa rotativa MOTOPOS da célula robótica para reposicionar as peças, garantindo a perpendicularidade da tocha em relação à região de deposição.

Figura 57 – Detalhamento dimensional do cilindro e cubo com ressalto utilizados para validação do algoritmo.



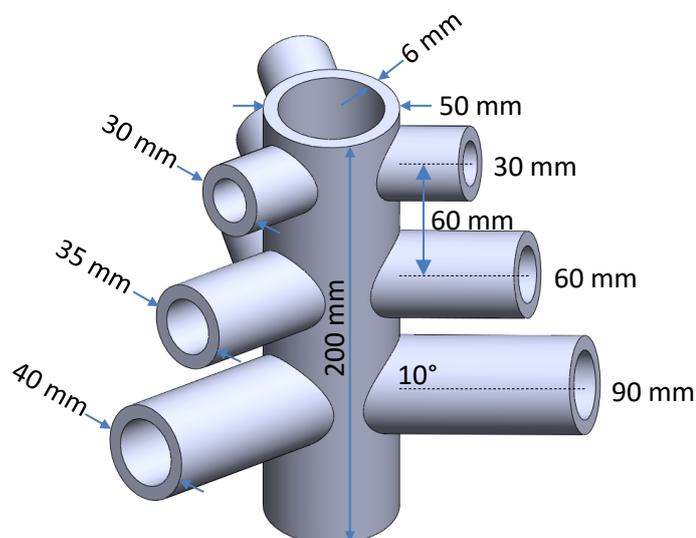
Fonte: Autor.

Figura 58 – Detalhamento dimensional de cilindro com derivações (Candelabro) variando os diâmetros utilizado para validação do algoritmo.



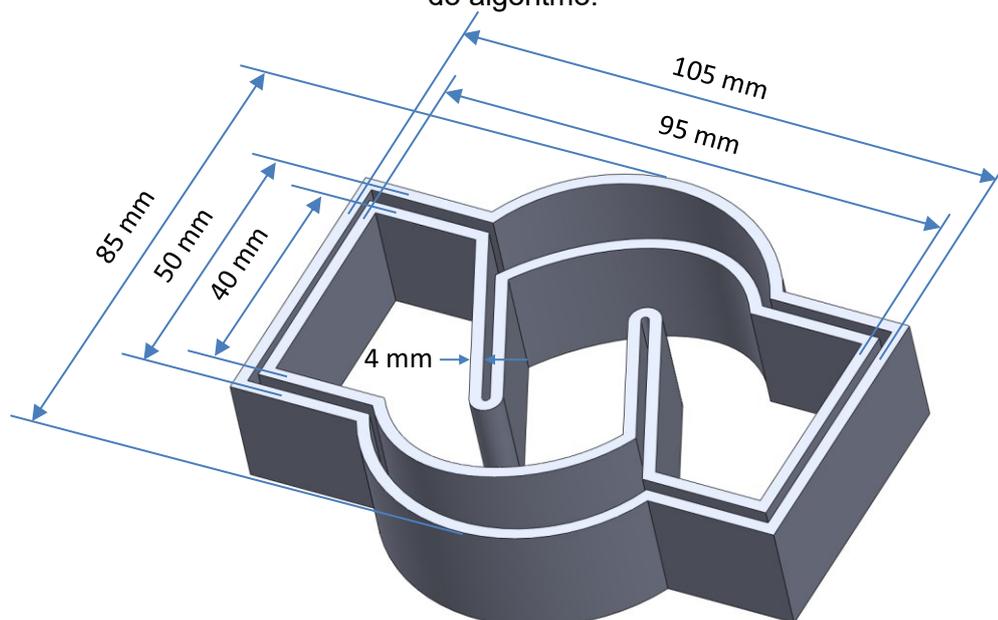
Fonte: Autor.

Figura 59 – Detalhamento dimensional de cilindro com derivações (Árvore de Natal) variando os diâmetros utilizado para validação do algoritmo.



Fonte: Autor.

Figura 60 – Detalhamento dimensional do logotipo do LABSOLDA utilizado para validação do algoritmo.

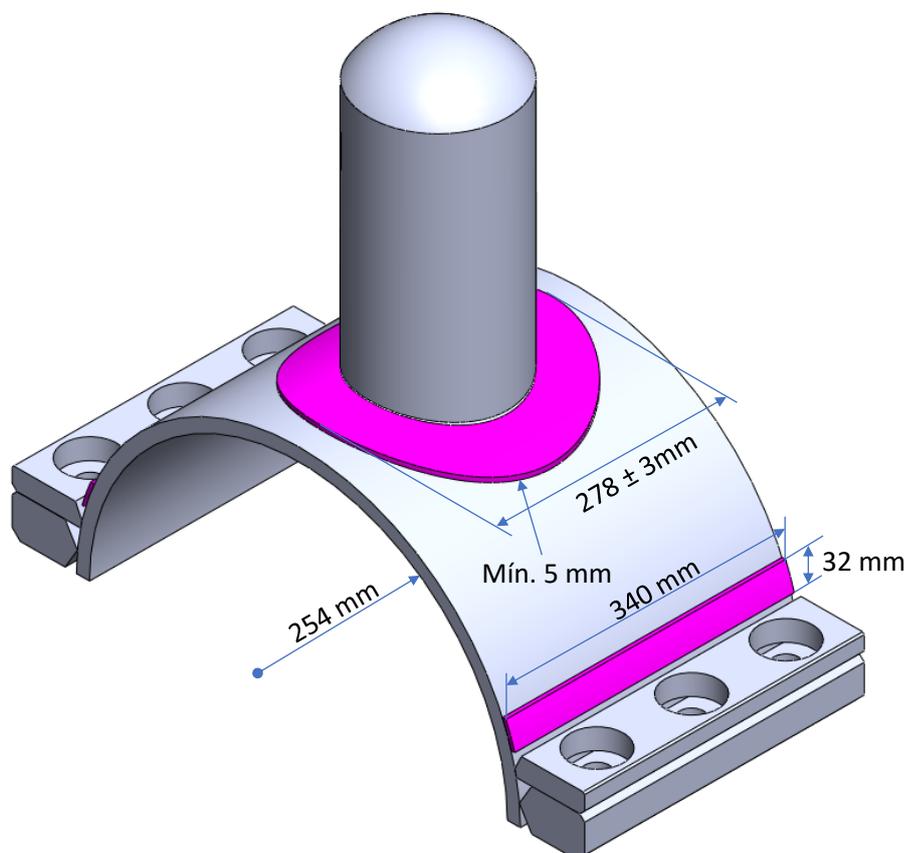


Fonte: Autor.

A escolha dessas geometrias visou abordar uma variedade de desafios na manufatura aditiva, permitindo uma análise abrangente da capacidade do algoritmo em prever parâmetros ideais para cada configuração. O processo de impressão dessas peças proporcionou um melhor entendimento sobre a aplicabilidade e robustez do algoritmo em diferentes contextos geométricos, consolidando assim a validação do método proposto.

Adicionalmente às peças de validação, foram aplicadas as diretrizes geradas no escopo desta tese para realizar um processo de reforço por manufatura aditiva em uma abraçadeira industrial aplicada em reparos temporários e permanentes de dutovias no setor de óleo e gás. Esta abraçadeira foi projetada e fabricada como parte de um projeto de pesquisa financiado pela Petrobras, intitulado "Processos de reparos alternativos: soldagem em operação de abraçadeiras aparafusadas e bujão (capote) – SIGITEC: 2017/00379-0", com a colaboração do LABSOLDA e GRANTE. No projeto desta abraçadeira, o foco estava na redução da espessura da casca. No entanto, simulações computadorizadas indicaram que algumas regiões críticas precisariam de reforços localizados para garantir a integridade mecânica. A Figura 61 destaca as dimensões e as regiões reforçadas por manufatura aditiva, sendo estas a região próxima ao capote, cuja geometria é um parabolóide hiperbólico, e a região próxima ao flange, caracterizada por um retângulo simples, ambos os reforços tinham como critério de espessura um mínimo de 5 mm.

Figura 61 – Vista isométrica do CAD da abraçadeira com detalhe as regiões reforçadas por MA.



Fonte: Autor.

Para essa operação, a programação da trajetória foi realizada de maneira diferente das demais peças, onde se utilizou o software de CAM SprutCAM para a programação da trajetória. Neste caso específico, as saídas do algoritmo de predição de parâmetros foram implementadas diretamente no controlador DX100 do robô Motoman HP20, sem o auxílio de um software de CAM, utilizando a linguagem de programação Inform III. Essa abordagem foi adotada devido às variações geométricas entre o modelo CAD e a peça. O algoritmo gerado para a programação dessa operação seguiu o fluxo descrito de forma detalhada no Apêndice B.

Para definição dos parâmetros de soldagem e diretrizes operacionais, aplicou-se o método proposto no algoritmo de parametrização nas peças destinadas à validação. Com isto, obteve-se os parâmetros e diretrizes para cada segmento das peças propostas, em função de suas dimensões. A Tabela 16, apresenta os

parâmetros de soldagem e de trajetória que o algoritmo retornou para cada segmento da peça.

Tabela 16 – Tabela de parâmetros utilizados na fabricação das peças de validação.

Peça	Segmento A	Segmento B	Segmento C	Segmento D
Cilindro com ressalto	VD 60 cm/min VA 6,0 m/min DEC 4,2 mm IV 2,1 mm TI 150 °C 4 Sobreposições 12 Camadas	VD 60 cm/min VA 7,0 m/min DEC 4,5 mm IV 2,2 mm TI 150 °C 1 Sobreposições 12 Camadas	-	-
Cubo com ressalto	VD 60 cm/min VA 6,0 m/min DEC 4,2 mm IV 2,1 mm TI 150 °C 4 Sobreposições 12 Camadas	VD 60 cm/min VA 7,0 m/min DEC 4,5 mm IV 2,2 mm TI 150 °C 1 Sobreposições 12 Camadas	-	-
Cilindro com derivações (Candelabro)	VD 60 cm/min VA 4,0 m/min IV 1,7 mm TI 150 °C 115 camadas	VD 60 cm/min VA 4,0 m/min IV 1,7 mm TI 150 °C 59 camadas	VD 60 cm/min VA 4,0 m/min IV 1,7 mm TI 150 °C 35 camadas	
Cilindro com derivações (Árvore de Natal)	VD 60 cm/min VA 5,0 m/min IV 1,9 mm TI 150 °C 105 camadas	VD 60 cm/min VA 5,0 m/min IV 1,9 mm TI 150 °C 45 camadas	VD 60 cm/min VA 5,0 m/min IV 1,9 mm TI 150 °C 32 camadas	VD 60 cm/min VA 5,0 m/min IV 1,9 mm TI 150 °C 16 camadas
Logotipo LABSOLDA	VD 75 cm/min VA 4,0 m/min IV 1,5 mm TI 150 °C 20 camadas	-	-	-
Abraçadeira	VD 60 cm/min VA 6,0 m/min DEC 4,2 mm IV 2,1 mm TI 150 °C 12 sobreposições 3 camadas	VD 60 cm/min VA 6,0 m/min DEC 4,2 mm IV 2,1 mm TI 150 °C 6 sobreposições 3 camadas	-	-

VD – Velocidade de deslocamento; VA – Velocidade programada de alimentação; DEC – Distância entre centros de cordões; IV – Incremento vertical; TI – Temperatura intercamada.

Fonte: Autor.

Vale destacar que as demais diretrizes como, por exemplo, trajetória e conexão entre cordões, foram estabelecidas conforme padrões que demonstraram os melhores resultados nos estudos anteriores.

Após a produção das peças, realizou-se uma medição comparativa com os modelos CAD correspondentes para avaliar a fidelidade geométrica. Essa análise das diferenças entre as medidas reais e os modelos digitais evidenciou a capacidade do

algoritmo em prever não apenas os parâmetros de soldagem, mas também a conformidade geométrica das peças fabricadas. Os resultados desta validação visam destacar a eficácia do algoritmo em obter peças com dimensões e características próximas às especificações desejadas (*near net shape* ou *net shape*), consolidando a robustez do método na manufatura aditiva.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados em detalhes os resultados obtidos ao longo da experimentos realizados para consecução do objetivo geral e escopo desta tese.

### 5.1 CARACTERIZAÇÃO E ANÁLISE COMPARATIVA DE DIFERENTES MISTURAS GASOSAS COM VISTAS A TRANSFERÊNCIA METÁLICA E GEOMETRIA DO CORDÃO

Antes de apresentar os resultados é importante comentar que nos processos de soldagem a arco elétrico a composição química da atmosfera protetora pode inferir características exclusivas tanto no comportamento elétrico como no comportamento físico do processo, o que envolve além da transferência metálica o aspecto geométrico do cordão de solda formado [108].

Dentre as misturas gasosas, as que abrangem um número significativo de aplicações dentro da soldagem são as misturas baseadas em argônio e dióxido de carbono, onde as concentrações de  $\text{CO}_2$  podem variar de 2% a 100%. O dióxido de carbono, segundo Kah et al. [109], por se tratar de um gás molecular apresenta uma energia de dissociação e ionização relativamente alta, o que implica em tensões de arco maiores em função de sua concentração, uma vez que para ocorrer a ionização antes é necessário ocorrer a dissociações de parte das moléculas. A dissociação do  $\text{CO}_2$  gera um aumento do volume e da pressão do arco, favorecendo assim a penetração. Por outro lado, quando utilizado sozinho confere certa instabilidade ao processo, por isso a utilização em conjunto, por exemplo, com argônio é interessante.

Da mesma forma que o  $\text{CO}_2$  puro confere certa instabilidade ao processo o argônio puro também apresenta um comportamento similar, mas devido a outros fatores. Segundo Hertel et al. [108] e Kah et al. [109], o argônio por apresentar baixa energia de ionização, que se traduz em tensões de arco menores, e consequentemente menores potências, tende a gerar um arco instável com baixa condutividade térmica, favorecendo a formação de cordões depositados convexos e com baixa penetração, quando comparados as misturas baseadas em  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2$  ou He.

Nos experimentos a seguir realizou-se a caracterização da transferência metálica da variante CMT do processo GMAW, sob a ótica da manufatura aditiva. Para

este trabalho considerou-se a utilização de argônio puro e dois percentuais de CO<sub>2</sub>, 8% e 25%, pois de acordo com Hertel et al. [108] corroborando com Kah et al. [109], valores excessivamente maiores que 10% de CO<sub>2</sub> tendem a gerar instabilidade no processo devido ao perfil de ancoramento anódico influenciado pelo aumento da vaporização metálica, dentre outros fatores, como por exemplo, o favorecimento da formação de ilhas de sílica na superfície e nos flancos de cordões soldados com aço carbono, o que é indesejável na fabricação de peças por manufatura aditiva.

Conforme visto, o CMT é uma variante do processo GMAW com alimentação dinâmica. Há fenômenos físicos envolvidos na transferência metálica que ainda não são completamente explicados na literatura. Neste capítulo, serão discutidos alguns destes fenômenos elétricos e físicos envolvidos na transferência metálica desta variante do processo GMAW.

### **5.1.1 Análise da estabilidade para definição da faixa operacional**

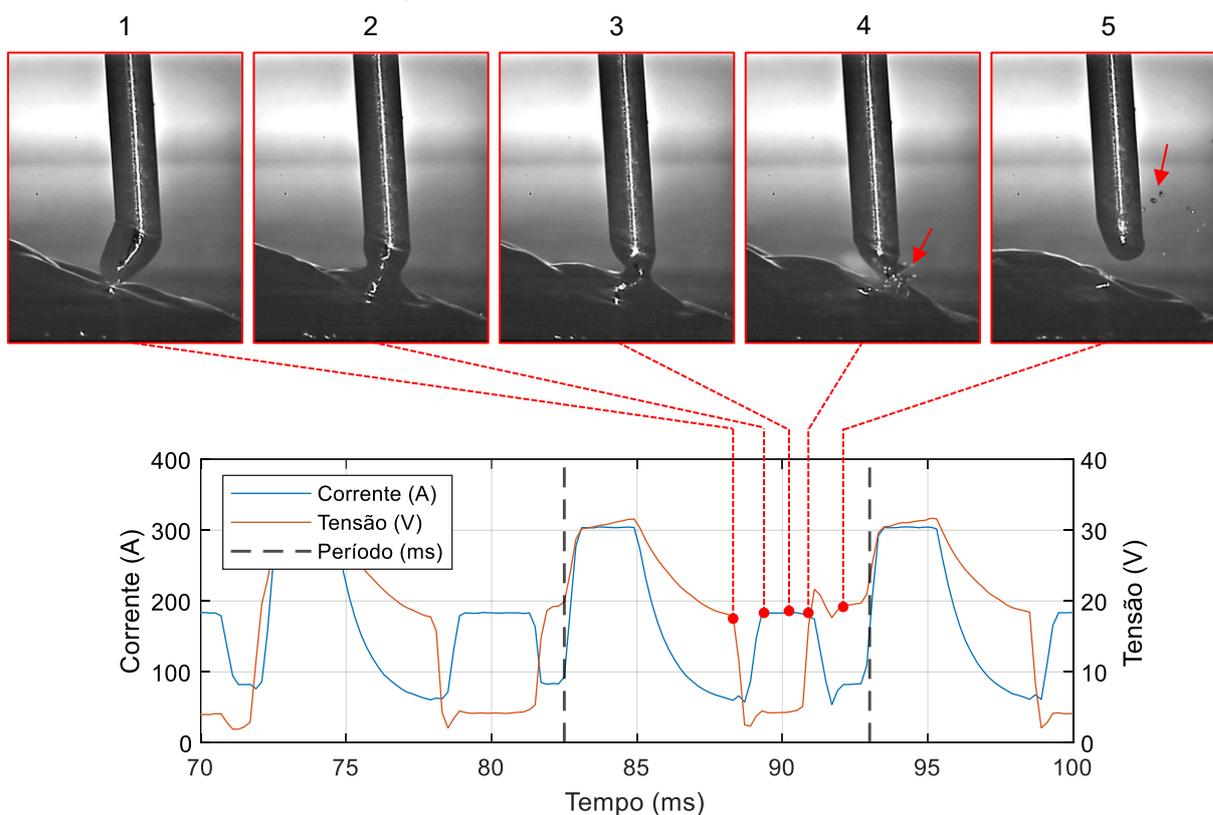
A forma de onda da variante CMT para o aço é bastante característica, conforme exemplificado na Figura 3, apresentando um pulso de corrente de alta intensidade, uma rampa não linear ou exponencial decrescente até um ponto de base, seguido de um pulso de corrente na fase de curto-circuito que culmina em um segundo ponto de base próximo ao momento de destacamento. O comportamento expresso é o esperado ao longo de toda a operação. Contudo, como vivemos em um mundo probabilístico, é esperado que em algum momento da operação ocorram divergências do esperado, caracterizando uma instabilidade que pode ser tolerável dependendo da sua intensidade.

Na variante CMT, como ilustrado na Figura 62, os pontos de instabilidade na transferência metálica ocorrem durante a reabertura (4). Isso se deve à ruptura prematura da ponte metálica causada pelo acoplamento incompleto e/ou insuficiente da gota à poça (1) metálica. Tal falha acontece devido à incorreta interpretação do curto-circuito pelo sistema de avanço, que deveria manter a aceleração do arame em direção à poça, em vez de iniciar a desaceleração. Isso, somado ao efeito *pinch* fomentado pela força de Lorentz induzida pelo pulso de corrente na fase de curto-circuito (2, 3), gera uma instabilidade que facilita a transferência da gota para a poça [25]. Por outro lado, independentemente do comportamento dinâmico da alimentação de arame, quando é detectada a ruptura da ponte metálica (4), o controle da fonte

encerra a etapa de curto-circuito e inicia o recuo do arame, simultaneamente ao pulso de corrente associado à fase de arco (5).

Esse comportamento específico torna a quantificação da estabilidade do processo difícil por métodos convencionais, uma vez que ao analisar o comportamento do período ou do tempo de curto-circuito, não se observa uma diferença expressiva em relação à média. Nesse contexto, a partir da observação dos pontos de início e fim do curto-circuito considerando o comportamento esperado, foi desenvolvido um método específico. Esse método foca em identificar o número de períodos corretos em uma amostra de  $n$  períodos e, a partir disso, estimar um percentual de acertos. Além desse método, outro método baseado na teoria da informação foi utilizado. Esse método calcula a entropia do sinal a partir do teorema de Shannon.

Figura 62 – Momento de instabilidade registrado por filmagem em alta velocidade para VA programada de 5 m/min e mistura C25.

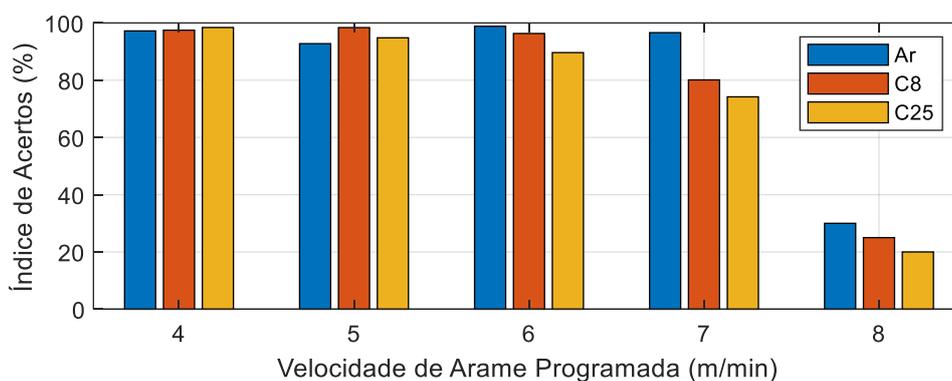


Fonte: Autor.

A partir dessas considerações sobre o comportamento da instabilidade e aplicando o método descrito na metodologia, observou-se que a estabilidade do CMT diminui à medida que a velocidade de alimentação aumenta. Isso acontece

independentemente do percentual de CO<sub>2</sub> no gás de proteção, como evidenciado no gráfico apresentado na Figura 63. O gráfico ilustra o percentual de acertos na transferência metálica para a faixa de velocidade de arame (VA) de 4 a 8 m/min, considerando as misturas de argônio e as misturas C8 e C25.

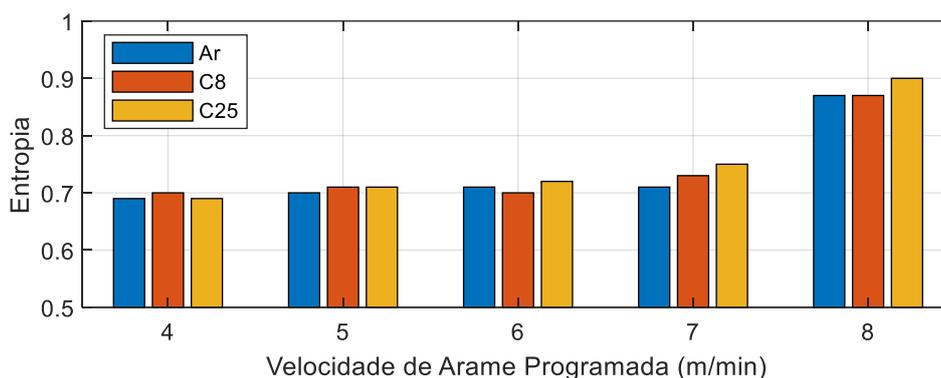
Figura 63 – Percentual de acertos de reabertura.



Fonte: Autor.

Aplicando a método de Shannon para calcular a entropia dos sinais de corrente e tensão obteve-se os dados presentes no gráfico da Figura 64. Foi possível verificar que o nível de entropia se mantém, na média, constante independente da mistura gasosa, apresentando um aumento significativo a partir da VA programada de 8 m/min. Neste contexto, é possível inferir que a entropia do sinal aumenta à medida que a instabilidade do processo aumenta, o que corrobora com os dados obtidos utilizando o método de cálculo de acertos da reabertura e se mostrando também como um método viável para determinação da estabilidade do processo.

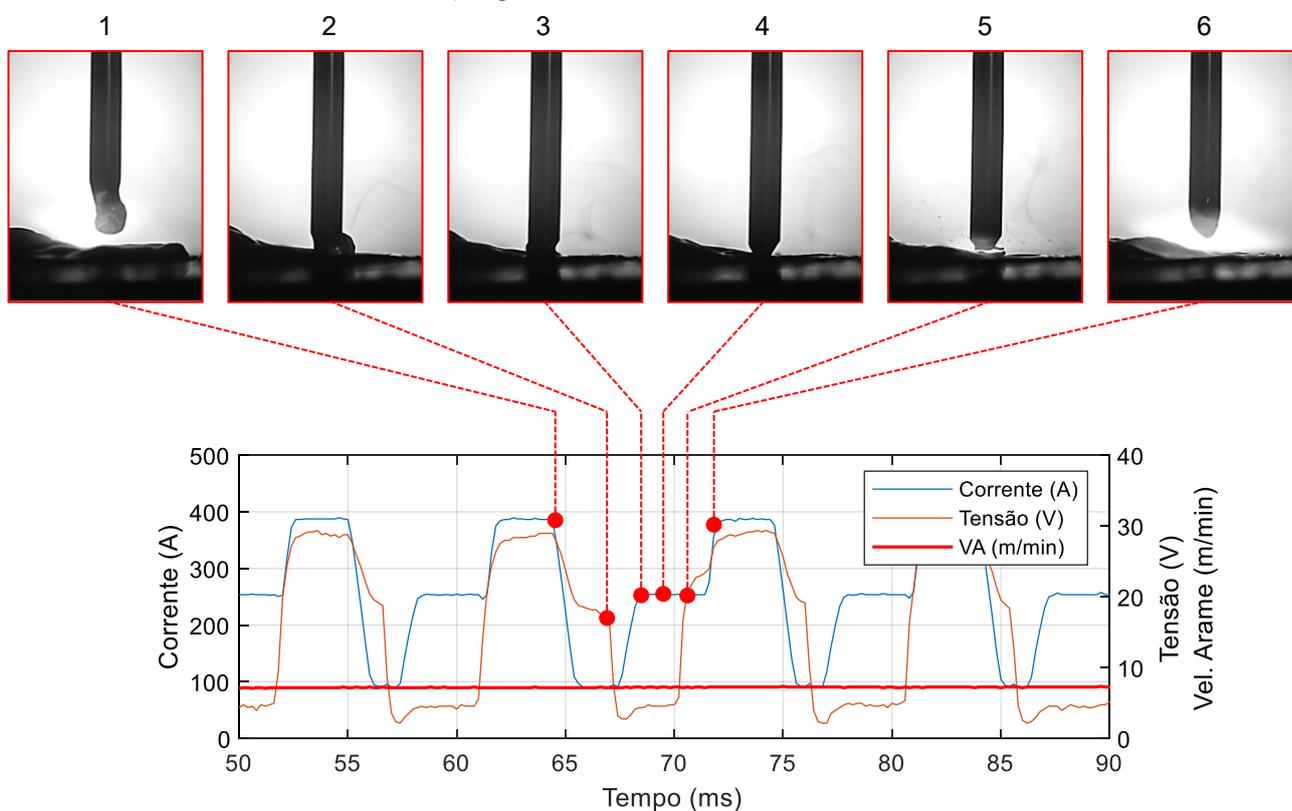
Figura 64 – Entropia de Shannon do sinal de corrente de reabertura.



Fonte: Autor.

Esta redução na acurácia da reabertura para a VA programada de 8 m/min ocorre devido a intensidade do pulso de corrente na fase de curto-circuito que, neste caso, gera o colapso prematuro da ponte metálica durante esta etapa, como mostram os frames da Figura 65, que corroboram com os resultados de Galeazzi et al. [25], os quais mostraram que o pulso de corrente na fase de curto-circuito tem como função principal auxiliar na estricção da ponte metálica atuando de modo a intensificar o efeito *pinch* por meio do aumento da força de Lorentz, sincronizado ao recuo do arame eletrodo. Além disso, observou-se um valor médio de corrente de aproximadamente 230 A.

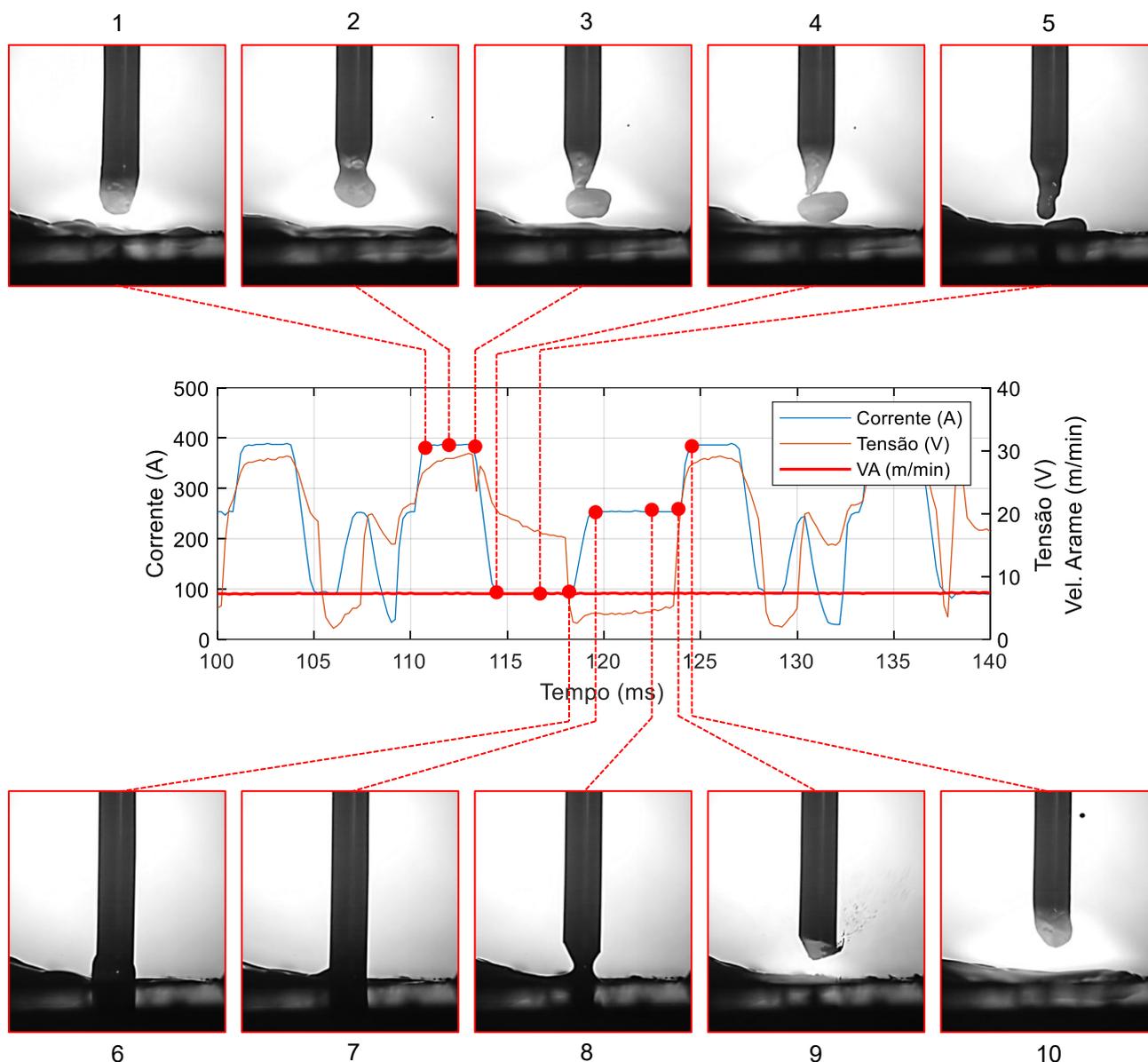
Figura 65 – Registro de colapso prematuro da ponte metálica em correntes elevadas para a VA programada de 8 m/min utilizando C8.



Fonte: Autor.

Além da reabertura incorreta do arco, foram observadas gotas secundárias na sequência do pulso de corrente durante a fase de arco. Estas gotas podem ser visualizadas na Figura 66. Acredita-se que este fenômeno ocorreu devido à intensidade do pulso, combinada com a elevada potência gerada, que se manteve na faixa de 4,5 kW para todas as misturas. Estas gotas ocorreram, em maioria, com uma frequência de aproximadamente 1 a cada 10 ciclos.

Figura 66 – Registro de gota secundária destacada durante a fase de arco para a VA programada de 8 m/min utilizando C8

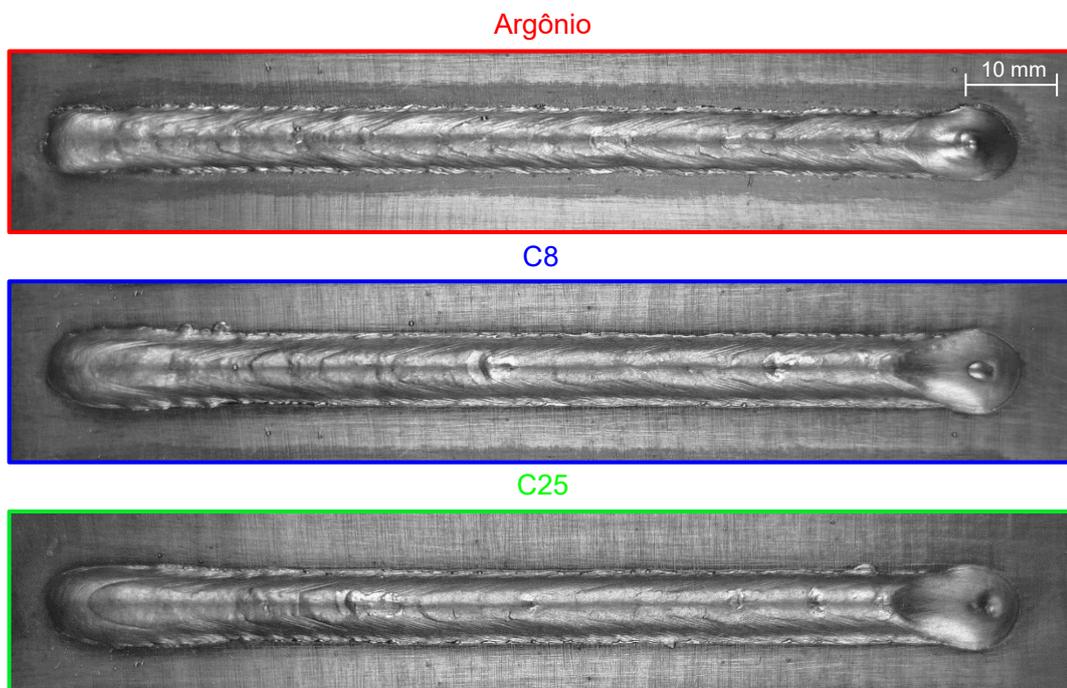


Fonte: Autor.

Todos esses fenômenos acabam reduzindo a precisão da transferência nesta faixa. Embora o processo opere adequadamente sem limitações significativas à sua aplicação, resultando cordões retílineos e homogêneos (Figura 67), a forma de onda produzida não segue o padrão esperado, típico da variante. Estas instabilidades, principalmente a reabertura em correntes elevadas geram fumos, vapores e respingos, além de provocar efeitos físicos sobre a poça de fusão, como aumento da pressão e oscilação, que influenciam diretamente na geometria do cordão. Esses

aspectos são cruciais para a manufatura aditiva, devido aos longos ciclos de deposição.

Figura 67 – Aparência superficial dos cordões depositados com a VA programada de 8 m/min e velocidade de deslocamento de 60 cm/min.



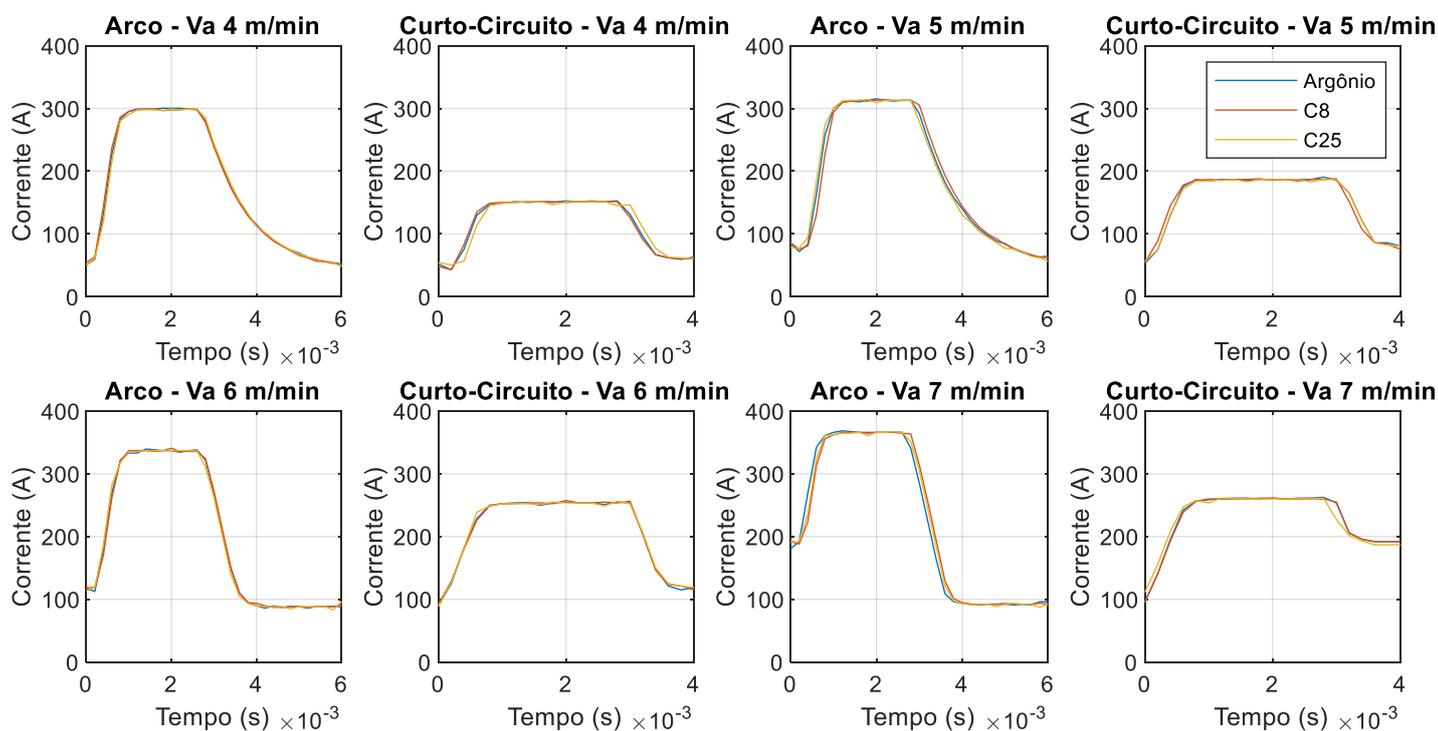
Fonte: Autor.

Com base nestes resultados e dado que a estabilidade do processo diminui para a VA programada de 8 m/min, definiu-se como limite superior para faixa operacional deste trabalho a VA programada de 7 m/min.

### 5.1.2 Análise dos aspectos elétricos do processo em função do gás de proteção

A partir da definição da faixa operacional de trabalho e para compreender o comportamento das variáveis elétricas do processo realizou-se um estudo da continuidade da forma de onda de corrente para cada gás de proteção utilizado, assim como para cada faixa de velocidade de arame programada. O objetivo deste estudo foi para isolar fontes de incertezas e aprimorar a precisão das análises realizadas. Dado que se trata de um processo controlado por corrente, espera-se que haja continuidade na forma de onda, independentemente da mistura gasosa utilizada. Esta asserção é confirmada quando se observa a sobreposição da forma de onda de corrente para cada VA programada dentro da faixa operacional. A Figura 68 ilustra a sobreposição das curvas de corrente aqisitadas tanto para a fase de arco como para a fase de curto-circuito.

Figura 68 – Sobreposição da curva de corrente do processo CMT para diferentes VAs e misturas gasosas.

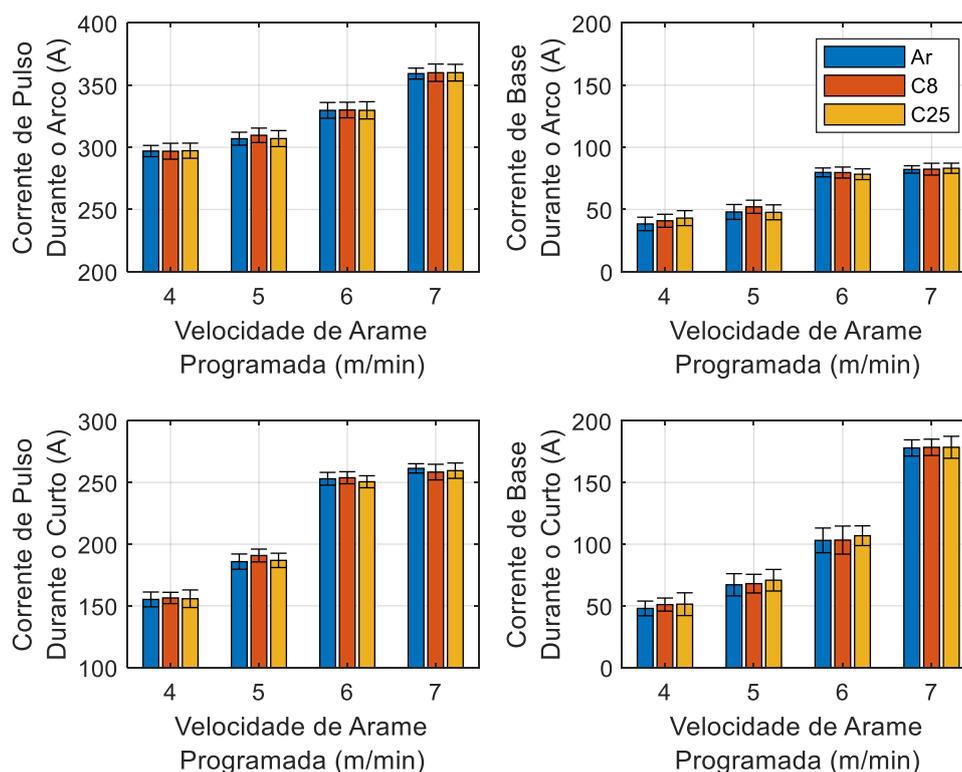


Fonte: Autor.

Observando de uma perspectiva macroscópica, ou seja, somente a forma de onda de corrente é possível observar uma continuidade dependente apenas da faixa de velocidade arame. Além disto, é possível verificar que à medida que se aumenta a

velocidade de alimentação a curva sinérgica sofre mudanças significativas não só em seus patamares de corrente, mas também nas suas regiões transientes, como mostram os gráficos da Figura 69.

Figura 69 – Patamares de corrente medidos para a curva de corrente do processo CMT para diferentes VAs e misturas gasosas.



Fonte: Autor.

Para a faixa de velocidades de arame de 4 m/min a 5 m/min na fase arco não foi verificada uma diferença expressiva entre os patamares de corrente, salvo um leve aumento da corrente de pulso para a VA de 5 m/min. Entretanto, ao se atingir faixas de VA programada de 6 m/min e 7 m/min o comportamento do pulso de corrente na fase de arco muda e além de um patamar mais elevado de corrente, exibe uma rampa de descida mais expressiva que as faixas de menor VA. Além disto, é possível observar um aumento exponencial da corrente de base após o pulso de corrente na fase de curto-circuito. Não obstante, os tempos de pulso tanto para fase de arco como para a de curto-circuito são mantidos constantes entre  $2,1 \pm 0,2$  ms e  $2,4 \pm 0,1$  ms para toda a faixa.

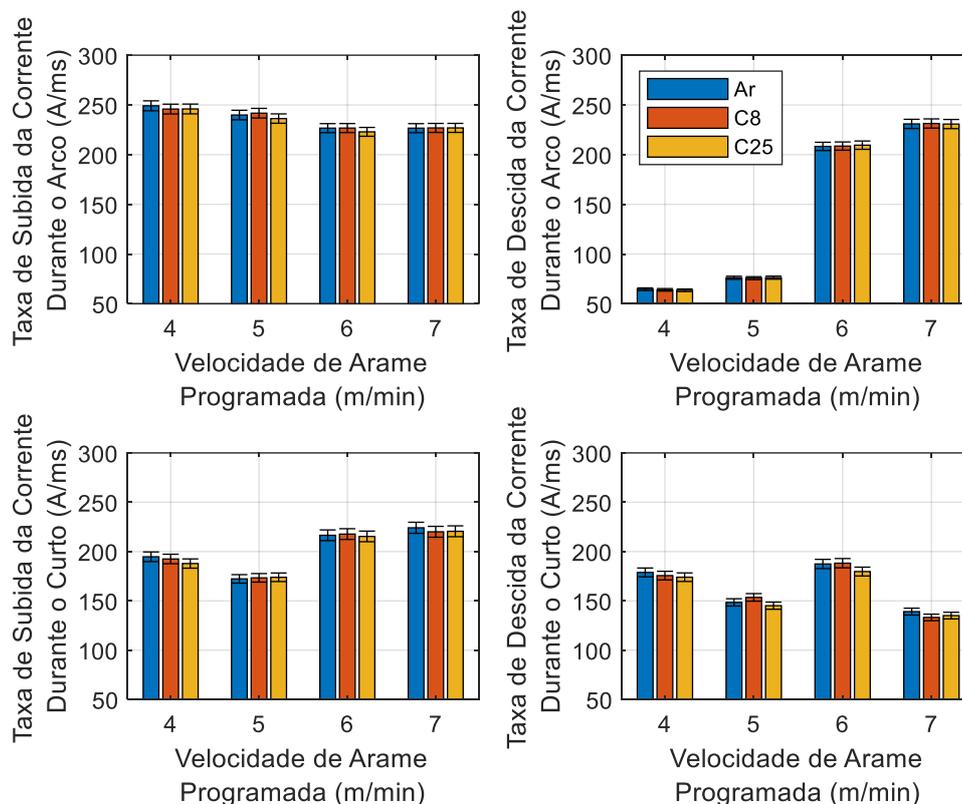
Outro ponto que pode ser discutido se relaciona com o pulso de corrente na fase de curto-circuito e sua função. Segundo Galeazzi et al. [25], o pulso de corrente

na fase de curto-circuito contribui para o rompimento da ponte metálica pelo aumento da ação das forças eletromagnéticas (efeito pinch). Isto irá refletir no comportamento do alongamento da ponte metálica e na amplitude de recuo do arame eletrodo quando a ruptura da ponte metálica é iminente, principalmente quando volume de material de transferido for elevado.

Nestes experimentos o pulso de corrente na fase curto-circuito transiciona de um valor de baixa intensidade (aprox. 160 A e 180 A) para as VAs de 4 e 5 m/min para um valor de alta intensidade (aprox. 250 A) para as VAs de 6 e 7 m/min. Acredita-se que este aumento expressivo na corrente de pulso durante o curto-circuito se deve ao fato de que neste ponto o diâmetro de gota é maior, uma vez que a frequência de destacamento é mantida parcialmente constante. Neste sentido é necessário um incremento significativo nas forças eletromagnéticas envolvidas nesta fase para auxiliar na estricção e ruptura da ponte metálica junto a tensão superficial [25, 110].

Como visto, a forma de onda do CMT apresenta algumas mudanças em sua estrutura à medida que se tem um aumento da VA, uma das mudanças mais expressivas que pode ser noticiada é o aumento da taxa de descida da corrente na fase arco na sequência do pulso para as VAs 6 e 7 m/min, como mostram os gráficos na Figura 70.

Figura 70 – Taxas de correntes medidas para a curva de corrente do processo CMT para diferentes VAs e misturas gasosas.



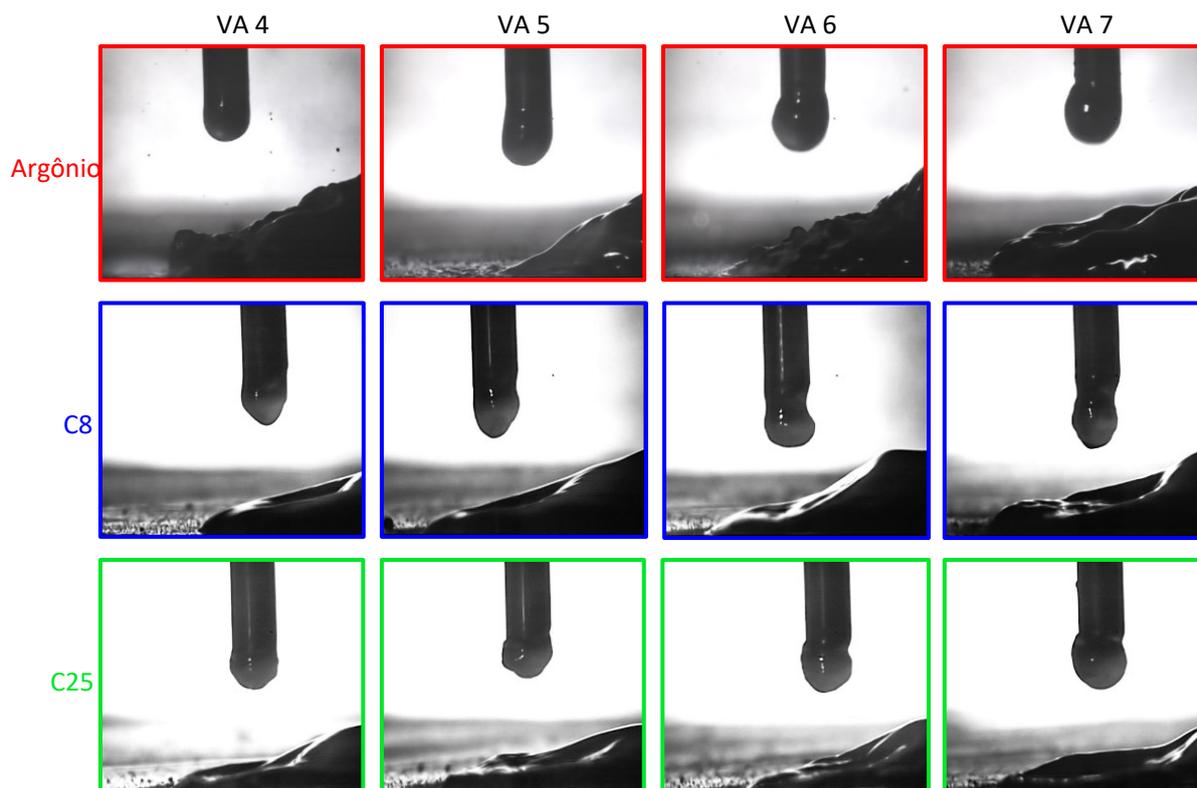
Fonte: Autor.

As taxas de descida da corrente nas VAs 6 e 7 m/min apresentam um comportamento linear com uma queda de 220 e 240 A/ms, enquanto para as VAs 4 e 5 m/min o comportamento exibe uma cauda exponencial que para fins de comparação foi linearizada e apresentou um valor aproximado de 60 e 70 A/ms. Acredita-se que esta queda abrupta da corrente a partir da VA de 6 m/min ocorra em função da elevada velocidade de avanço de arame praticada no momento. Sendo assim, ao se reduzir a corrente rapidamente após o pulso, evita-se a possibilidade de curtos-circuitos prematuros em correntes elevadas, mitigando assim instabilidades oriundas das forças repulsivas de contato. Por outro lado, para as VAs 4 e 5 m/min como a velocidade de avanço resultante é menor, a rampa de corrente pode ser mais lenta, pois o arame, neste contexto, levará mais tempo para atingir a poça de fusão.

Outra hipótese levantada sugere que a queda abrupta da corrente na faixa de 6 e 7 m/min atuaria de modo a atenuar possíveis transferências em voo livre, as quais poderiam ocorrer em função da intensidade de corrente aplicada, conforme visto na seção anterior para a VA programada de 8 m/min. Observando a transferência metálica

não se verificou indícios contundentes de que tal evento poderia ocorrer em função da intensidade da corrente, mistura gasosa ou faixa de VA, como mostra a Figura 71, que exibe frames capturados por meio de filmagem em alta velocidade, ao fim do pulso de corrente e na iminência do avanço do arame para cada faixa de VA e gás de proteção.

Figura 71 – Capturas em alta velocidade do fim do pulso de corrente na fase arco na iminência do avanço do arame.



Fonte: Autor.

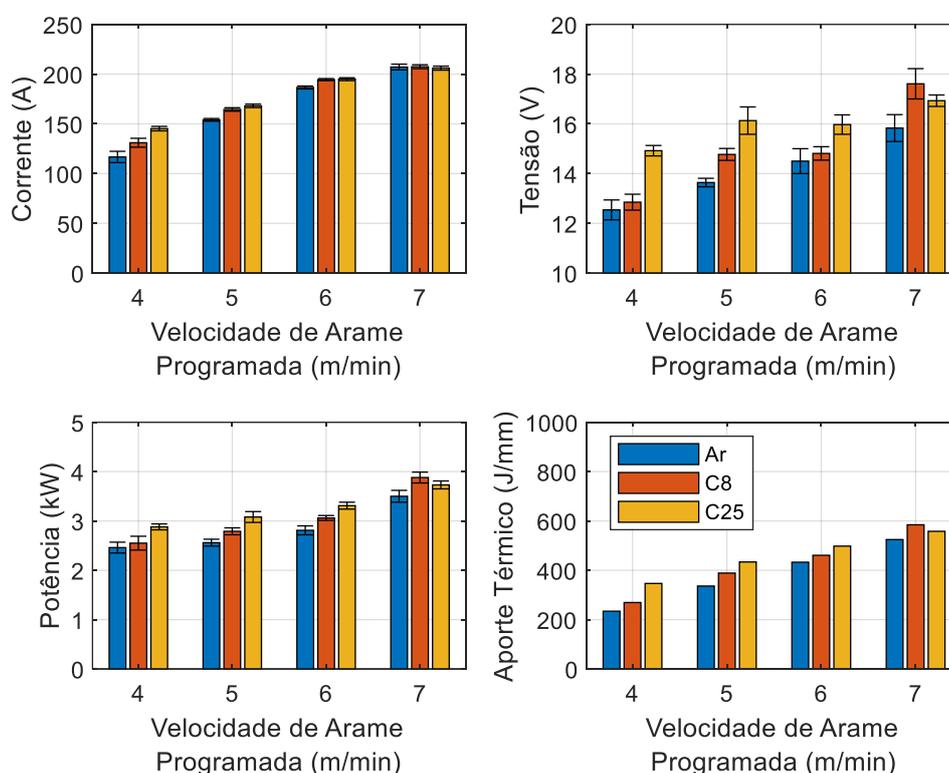
Para que tal evento ocorra, os tempos de pulso e/ou a intensidade de corrente devem ser expressivamente elevados, como no caso da VA programada de 8 m/min, que, exibe uma intensidade de pulso de corrente na fase de arco de, na média, 390 A. Isso gera instabilidades devido à quantidade de energia fornecida ao processo, o que favorece a transferência em voo livre, independentemente da mistura gasosa, conforme demonstram os frames da filmagem em alta velocidade na Figura 66.

Observando a fase de curto-circuito não foi verificado um padrão ou tendência entre as rampas de subida e descida da corrente. Porém, foi verificado maiores valores para as taxas de subida da corrente nesta fase, corroborando com os resultados de Galeazzi et al. [25], que concluem que o objetivo do pulso de corrente é

contribuir com o incremento das forças eletromagnéticas para complementar o efeito *pinch* e estrição da ponte metálica. Contudo, verificou-se uma maior dificuldade na ruptura da ponte metálica utilizando argônio, o que será discutido na próxima seção.

O comportamento elétrico do processo, ou seja, a tensão, a corrente e a potência, também podem ser analisadas por meio de seus valores médios. Dessa forma, foi possível observar que, embora os valores instantâneos de corrente, bem como suas taxas de descida e subida, sejam semelhantes independentemente da mistura gasosa, os valores médios passam a apresentar uma variação em função da mistura utilizada, como demonstrado nos gráficos da Figura 72.

Figura 72 – Valores médios de corrente, tensão, potência e aporte térmico para o processo CMT com diferentes VAs e misturas gasosas.



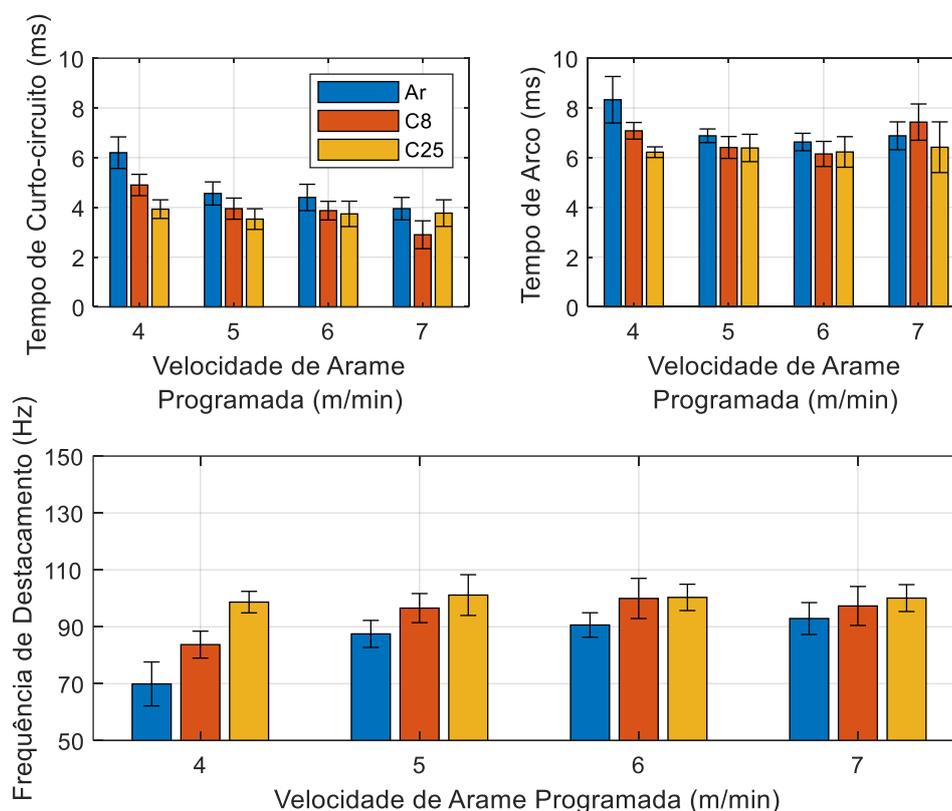
Fonte: Autor.

Para a corrente média, é possível observar uma diferença mais significativa para as velocidades de arame programadas de 4, 5 e 6 m/min em função da mistura gasosa, principalmente nos testes realizados com argônio. Este comportamento também se reflete na tensão, e, por consequência, na potência e no aporte térmico. O argônio, devido ao seu menor potencial de ionização em comparação com as misturas C8 e C25, tende a apresentar, nesse caso, valores de tensão mais baixos

[20, 109, 111]. Acredita-se que, devido a essa característica física do gás, a transferência metálica tenha sido influenciada. A redução do aporte de calor resultante dessa característica do argônio, teoricamente, modifica as propriedades termo físicas do processo, afetando, por exemplo, a tensão superficial, densidade e viscosidade da poça de fusão. Isso tende a prolongar o tempo de curto-circuito, diminuindo assim a frequência de destacamento por meio do aumento do período, o que influencia a redução da corrente média. Esse mesmo efeito pode ser estendido para as discrepâncias observadas entre o C8 e o C25. As demais variações, tanto na potência quanto no aporte térmico, são principalmente decorrentes do aumento da tensão do processo, a qual é determinada pelas características físicas da mistura gasosa, uma vez que a impedância do sistema foi a mesma para todos os testes. Além disso, acredita-se que haja influência de efeitos exotérmicos como a oxidação do ferro devido a presença de oxigênio oriundo da mistura (dissociação do  $\text{CO}_2$ ) também afetam em termos térmicos, elevando a temperatura do meio e, por consequência, os aspectos geométricos do cordão resultante.

Não obstante, à medida que se tem um aumento da corrente do processo devido ao aumento da velocidade de arame programada é observado uma redução da diferença entre as médias da corrente para cada mistura gasosa, isto ocorre a partir da VA de 5 m/min. Este efeito pode ser atribuído a uma composição de fatores, podendo ser explicado pelo aumento de energia entregue ao processo devido ao incremento da corrente média em função da faixa operacional em composição com redução do tempo de curto-circuito e conseqüentemente o aumento da frequência de destacamento como pode ser observado nos gráficos da Figura 73, que além da frequência de destacamento, mostram os tempos de arco e de curto-circuito que corroboram com a hipótese sugerida.

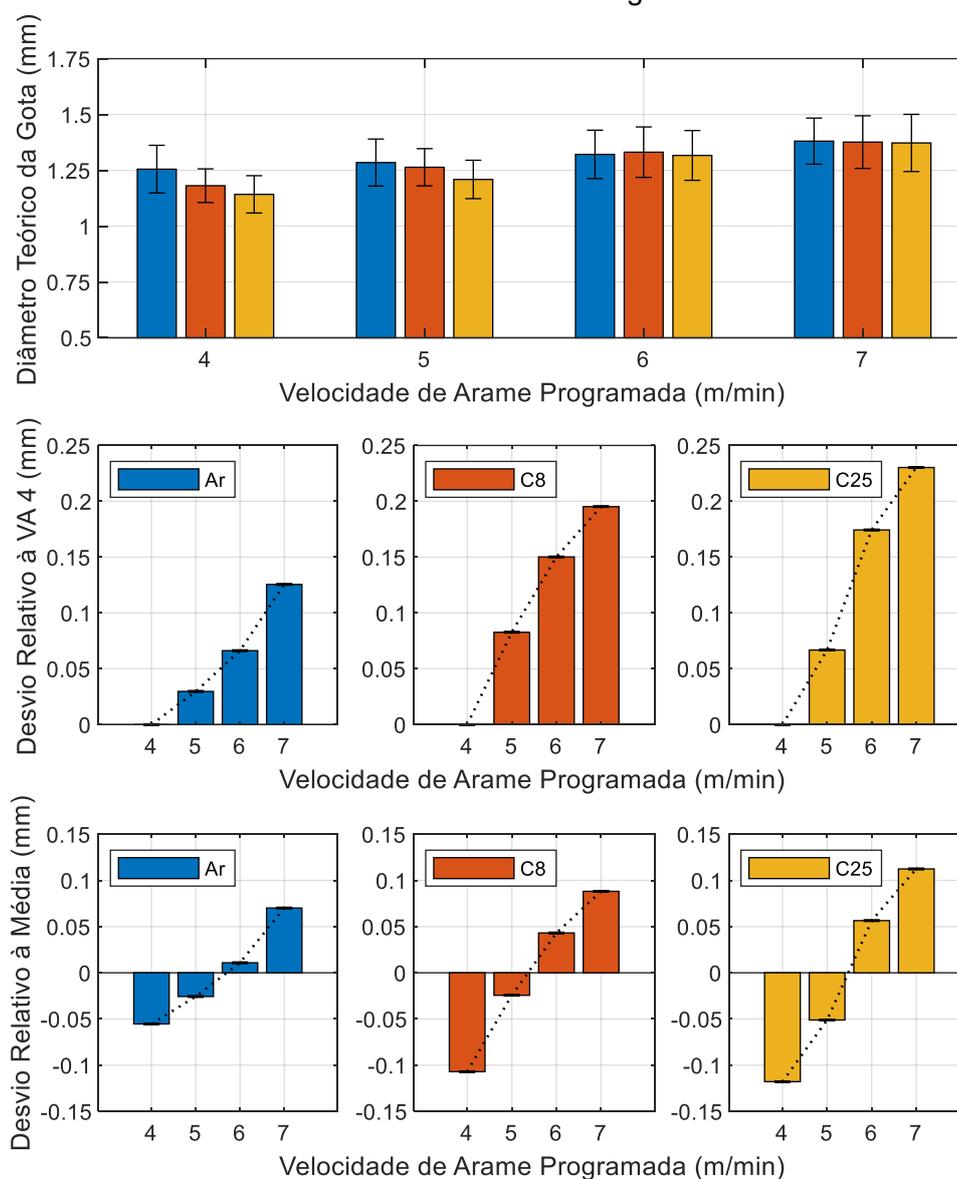
Figura 73 – Tempos de curto-circuito, arco e frequência de destacamento para o processo CMT com diferentes VAs e misturas gasosas.



Fonte: Autor.

Vale comentar que as frequências de destacamento, assim como os tempos de arco e tempos de curto-circuito, são bastante semelhantes em toda a faixa operacional investigada. Dessa forma, é possível inferir que o aumento da velocidade de alimentação impacta diretamente no diâmetro das gotas. Esta hipótese foi verificada por meio da filmagem em alta velocidade. Utilizando o método proposto, calculou-se o diâmetro equivalente das gotas para cada situação, conforme ilustram os gráficos da Figura 74. Nesses gráficos, é evidente um aumento gradual e quase linear do diâmetro equivalente da gota. Isso é notado pelo desvio relativo ao menor diâmetro de gota, ou seja, o diâmetro calculado para a velocidade de alimentação de 4 m/min, assim como pelo desvio relativo à média da amostra.

Figura 74 – Comportamento do diâmetro de gota equivalente para o processo CMT com diferentes VAs e misturas gasosas.



Fonte: Autor.

Nos experimentos com argônio, foi observada uma variação menor no diâmetro das gotas à medida que a velocidade de alimentação aumenta, em comparação com os demais gases. Esse dado pode ser explicado pelo fato de que, para o argônio, os períodos de destacamento são mais prolongados do que para os outros gases. Isso justifica os diâmetros de gota ligeiramente maiores para o argônio nas faixas de velocidade de alimentação programada de 4 e 5 m/min. Além disso, à medida que a frequência de destacamento aumenta para o argônio, observa-se uma equalização do diâmetro de gota em relação aos demais gases. Contudo, para

compreender o motivo desse comportamento, é necessário realizar uma análise detalhada da transferência metálica dessa variante.

### 5.1.3 Análise dos aspectos físicos da dinâmica de transferência metálica

O CMT, como já descrito, emprega uma técnica de transferência metálica eletromecanicamente controlada. Isso significa que combina o controle de corrente com uma alimentação dinâmica, resultante da integração de dois tracionadores. O cabeçote alimentador mantém uma velocidade de avanço do arame de forma contínua, enquanto a tocha, varia a velocidade do arame entre positiva (avanço) e negativa (reco), considerando o vetor resultante em direção à poça de fusão. Esse sistema pode ser visto como uma variante do sistema push-pull, pois inclui um dispositivo desacoplante entre os tracionadores. Esse dispositivo atua como um buffer, temporariamente armazenando o material não consumido durante o processo. O buffer é equipado com um sensor que detecta o consumo de material e pode ajustar a velocidade de alimentação do tracionador principal para mantê-lo próximo ao ponto neutro. A Figura 75 ilustra o comportamento do buffer em diferentes situações.

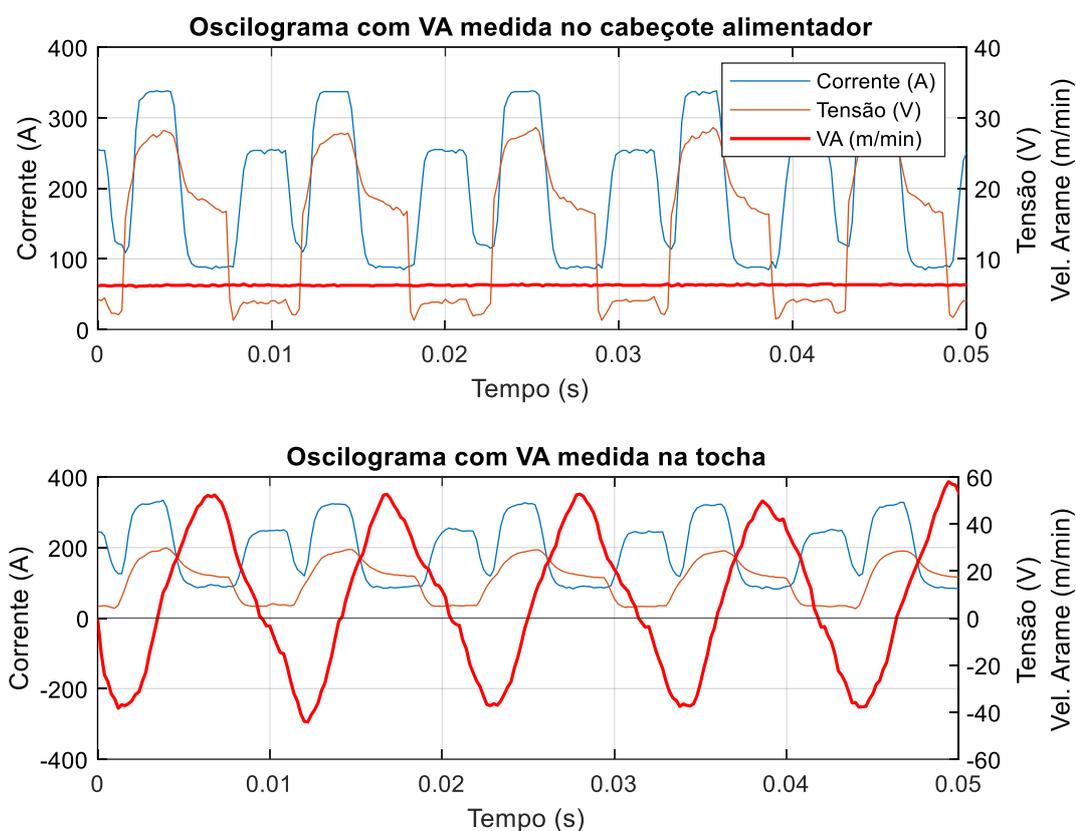
Figura 75 – Diferentes condições operacionais do sistema *Buffer*.



Fonte: Autor.

Para esta análise, a velocidade do arame foi medida tanto no cabeçote alimentador quanto na tocha de soldagem, especificamente no rolete acoplado ao servomotor da tocha CMT, conforme descrito na metodologia. Os gráficos da Figura 76 ilustram a diferença entre o comportamento da velocidade do arame entre o cabeçote alimentador e na tocha, considerando uma VA programada de 6 m/min com C8 como mistura gasosa.

Figura 76 – Oscilogramas do processo CMT com destaque a diferença entre VA lida no cabeçote alimentador e na tocha.

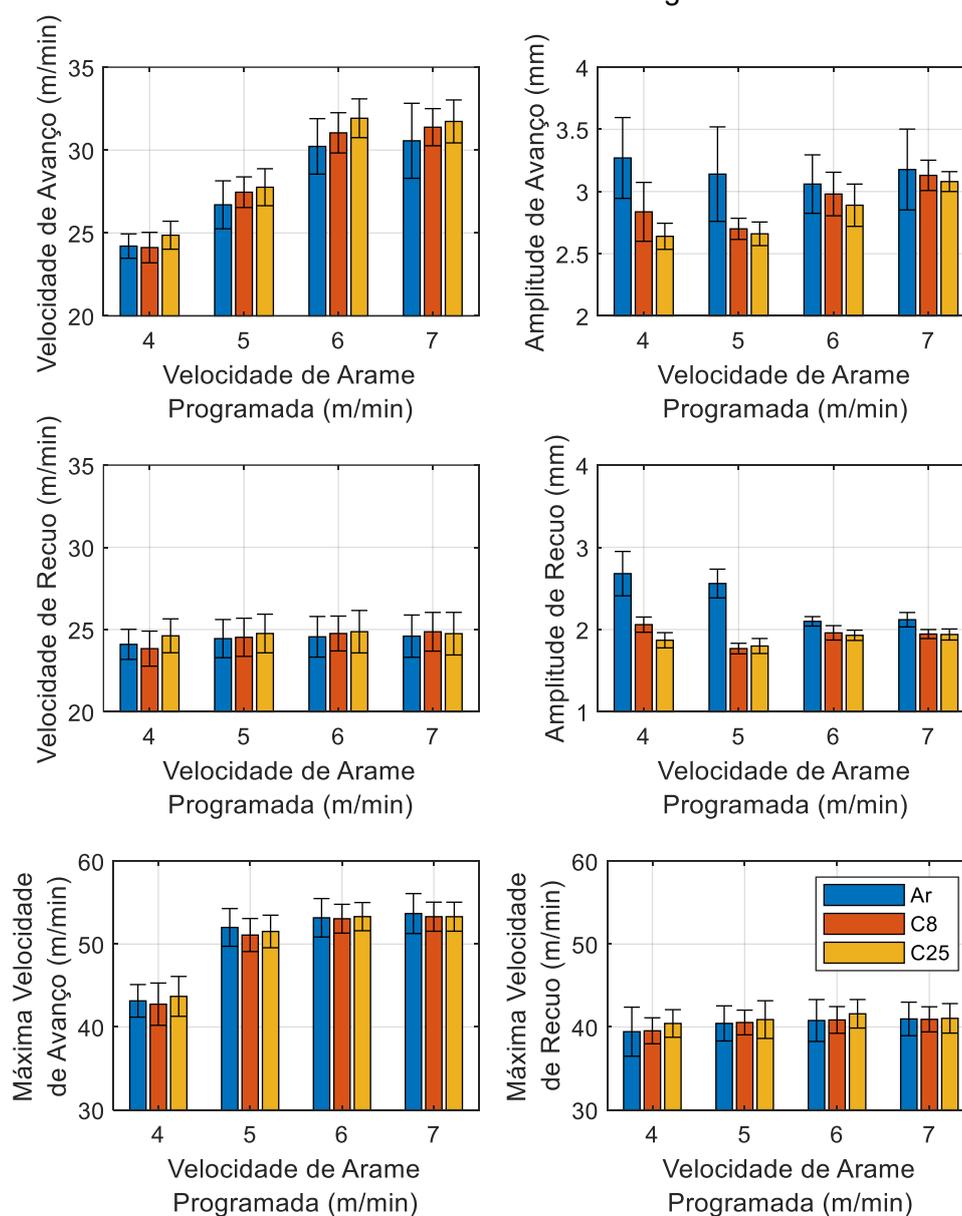


Fonte: Autor.

O comportamento dinâmico da oscilação do arame na tocha de soldagem foi observado e está apresentado nos gráficos da Figura 77. Pode-se notar uma tendência quase linear na velocidade média de avanço do arame, variando de aproximadamente 25 m/min até 34 m/min. Entre as VAs 6 e 7 não se verificou diferença na velocidade de avanço média, o que sugere um limite. Na fase de recuo, foram registrados valores semelhantes em toda a faixa operacional estudada, em torno de 25 m/min. As velocidades máximas de avanço observadas foram da ordem de 50 m/min, com exceção do caso com VA programada de 4 m/min, que apresentou

valores máximos da ordem de 42,5 m/min. Para o recuo, foram registrados valores da ordem de 40 m/min em todas as faixas. Observando a amplitude de avanço e recuo para cada faixa operacional, bem como para cada mistura gasosa, é possível verificar que houve apenas um desbalanço para o argônio. Este apresentou tanto amplitudes de avanço quanto de recuo relativamente maiores que os demais para as faixas de 4 e 5 m/min.

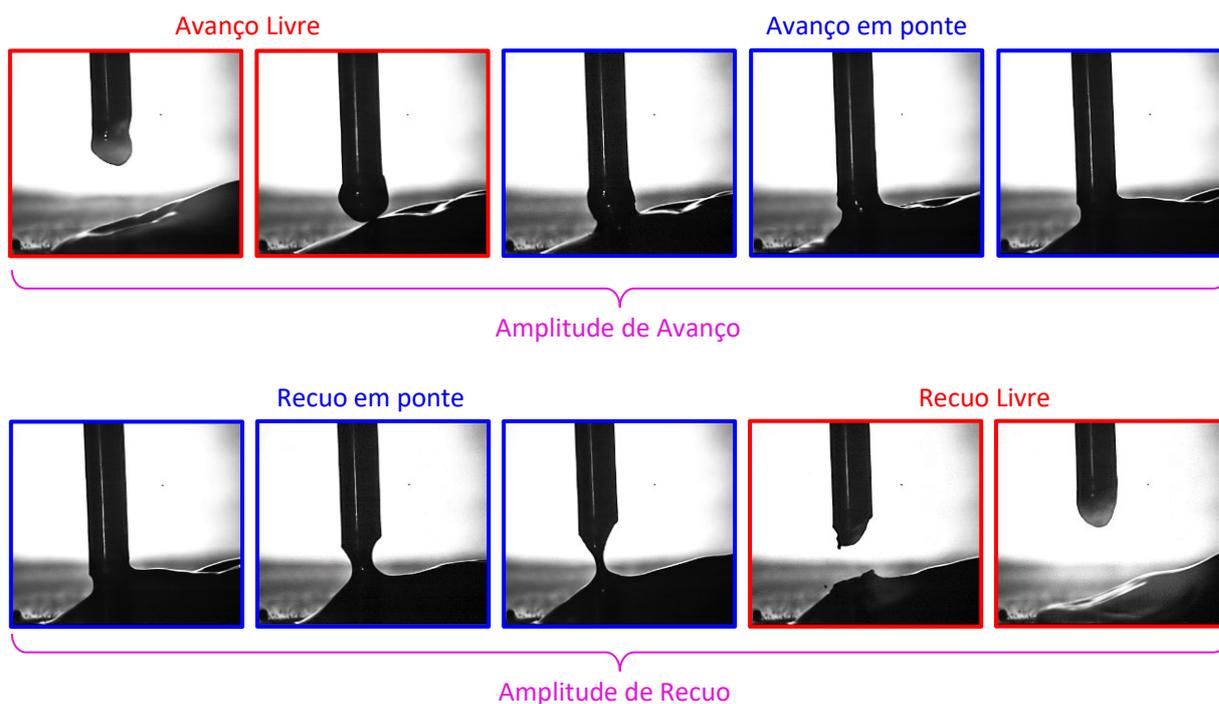
Figura 77 – Comportamento dinâmico da velocidade arame na tocha para o processo CMT com diferentes VAs e misturas gasosas.



Fonte: Autor.

Para complementar a análise do movimento do arame, utilizou-se filmagens em alta velocidade. Nestes experimentos, identificou-se que a amplitude de movimento consiste em uma composição de etapas. O avanço é composto por duas etapas, o avanço livre e o avanço em ponte ou mergulho do arame. O primeiro refere-se ao movimento do arame do seu ponto mais externo até o contato com a gota, definindo o curto-circuito. O segundo é o comprimento deslocado em direção à poça após o contato. Por outro lado, a amplitude de recuo também é composta por duas etapas, aqui denominadas recuo em ponte e recuo livre. O primeiro pode ser interpretado como o alongamento da poça devido à tensão superficial, e o segundo como o comprimento recuado após a ruptura da ponte metálica. A Figura 78 ilustra, por meio de frames extraídos da filmagem em alta velocidade, as etapas que compõem a amplitude de avanço e de recuo.

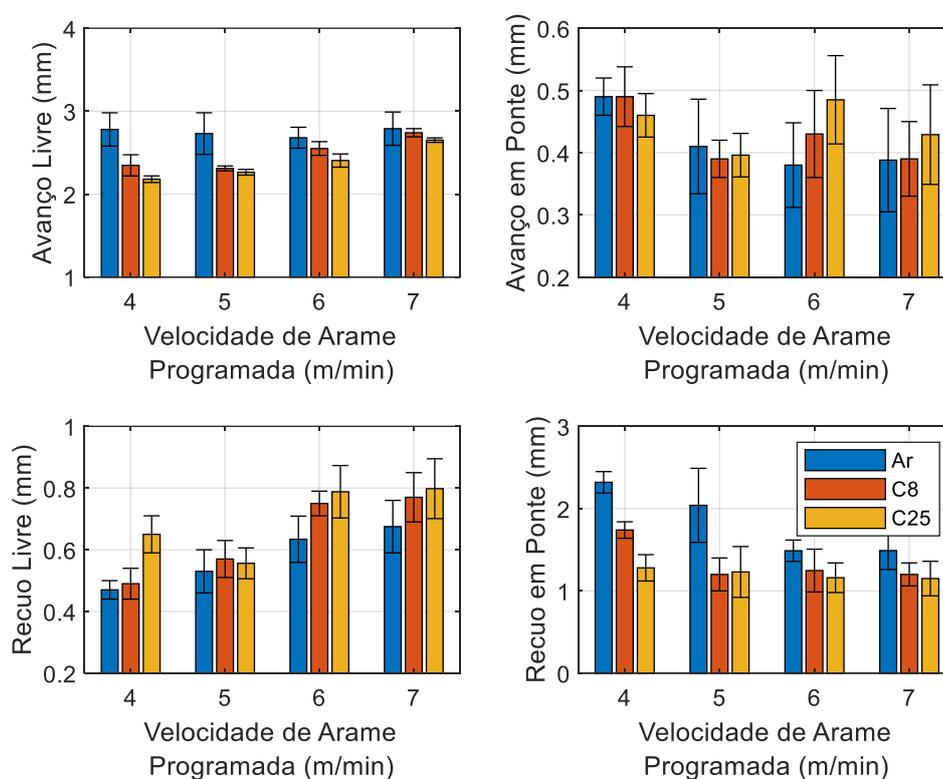
Figura 78 – Decomposição das etapas de amplitude para o avanço e recuo do arame.



Fonte: Autor.

Ao analisar as amplitudes e descompor as partes livre e acoplada, utilizando os sinais tanto da filmagem em alta velocidade quanto do SAP, obteve-se os gráficos apresentados na Figura 79.

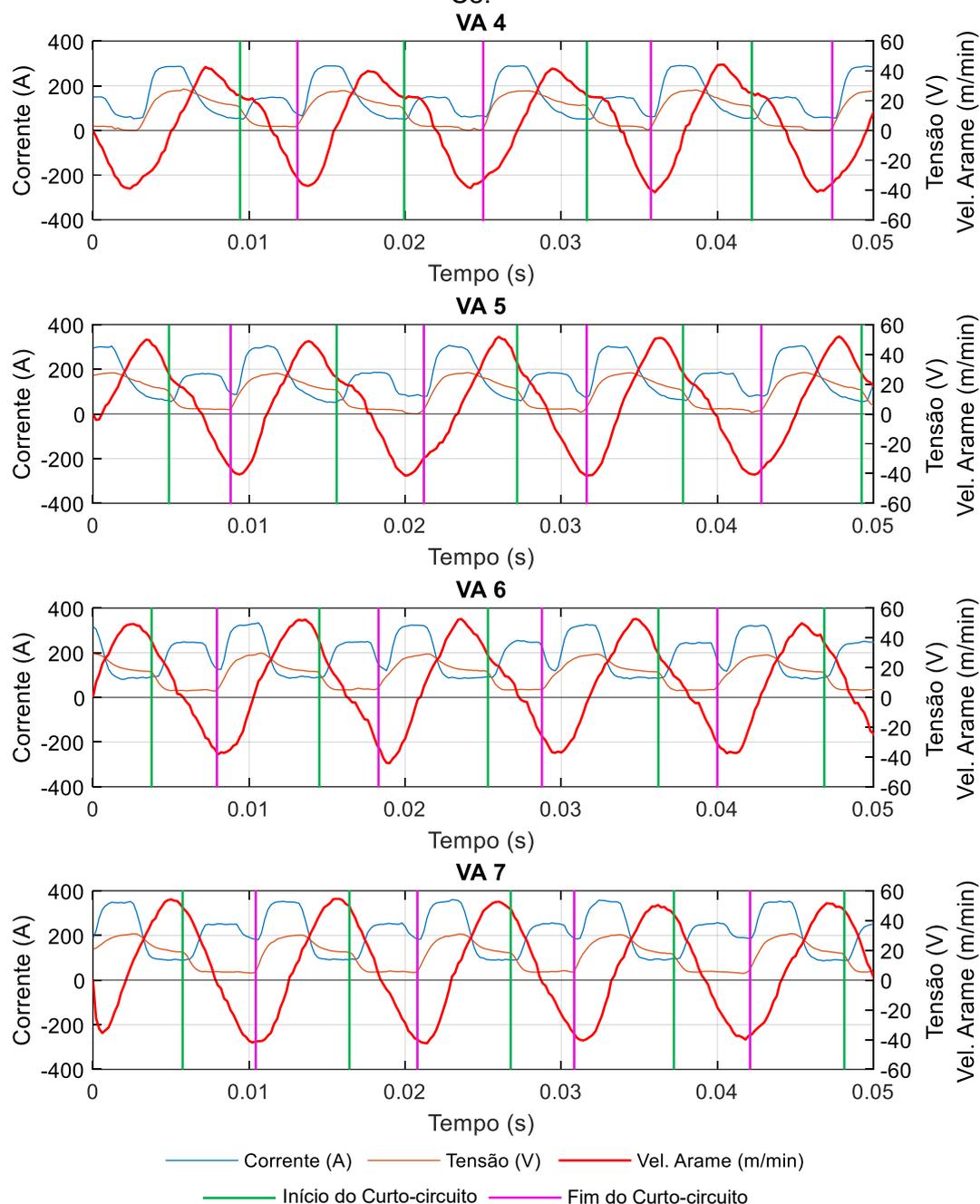
Figura 79 – Comportamento da amplitude de avanço e recuo para processo CMT com diferentes VAs e misturas gasosas.



Fonte: Autor.

A amplitude de avanço para a amostra analisada sempre começa no meio do pulso de corrente, onde a velocidade é zero e a amplitude é máxima. O arame acelera até atingir sua máxima velocidade ao longo de um período e então começa a desacelerar na iminência do curto-circuito. No entanto, após o curto-circuito, o arame continua avançando em direção à poça por alguns décimos de milímetro até parar completamente, como mostrado no detalhe 'Início do curto-circuito' nos oscilogramas da Figura 80, que exemplifica o fenômeno utilizando o conjunto de dados da mistura gasosa C8.

Figura 80 – Oscilogramas do processo CMT para diferentes VAs utilizando a mistura gasosa C8.

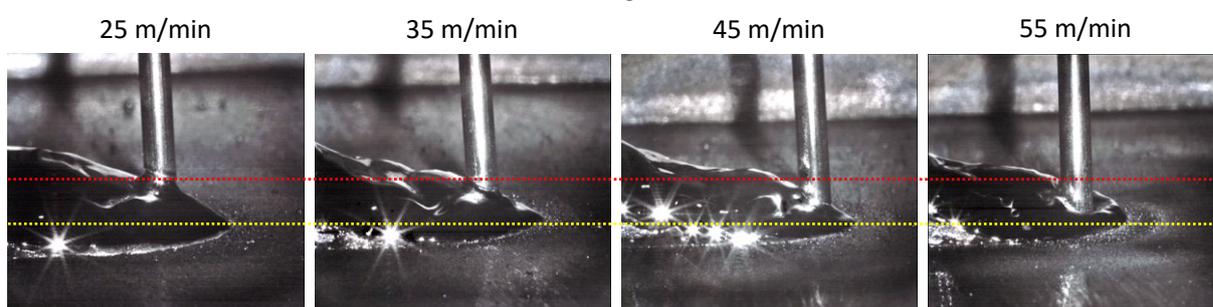


Fonte: Autor.

Como visto na Figura 79, os valores médios de mergulho ou avanço em ponte não apresentam uma tendência definida, variando na média de 0,4 a 0,5 mm independente da VA programada ou mistura gasosa, acredita-se que este comportamento aleatório pode ser decorrência da inércia desaceleração do servomotor. Para avaliar esta hipótese experimentos foram conduzidos observando por meio de filmagem em alta velocidade o comportamento do mergulho do arame

variando as velocidades de avanço ( $V_{d\_sc\_wait}$ ) entre 25, 35, 45 e 55 m/min para a velocidade de arame programada de 4 m/min e mistura gasosa C8, conforme descrito na metodologia. Nestes experimentos, verificou-se uma variação significativa no mergulho do arame na poça de fusão em função da velocidade média de avanço, conforme mostram os frames da Figura 81, corroborando com a hipótese sugerida, onde devido a inércia de movimento do servomotor o arame continua sendo alimentado independente da leitura do curto-circuito pelo controle da fonte.

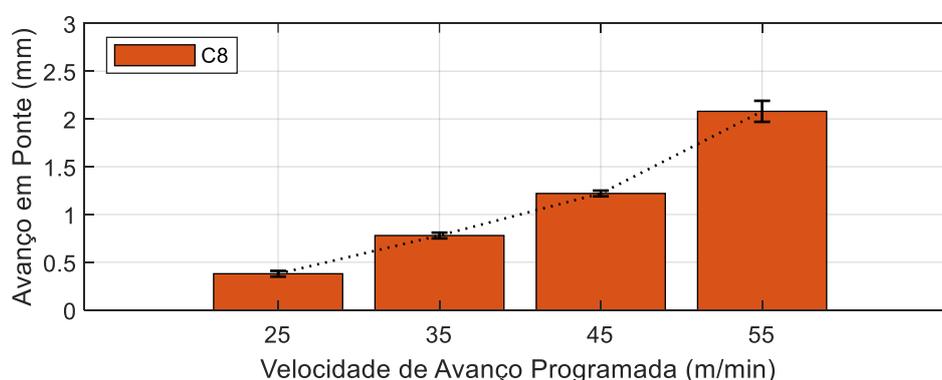
Figura 81 – Influência da velocidade avanço sobre o mergulho no processo CMT com VA 4 m/min e gás C8.



Fonte: Autor.

As medições de avanço em ponte ou mergulho, descritas no gráfico da Figura 82, indicam um comportamento com tendência linear do fenômeno, onde é possível verificar valores de 0,40 mm para 25 m/min que o padrão para esta faixa de VA, 0,80 mm para 35 m/min, 1,20 mm para 45 m/min e 2,1 mm para 55 m/min respectivamente.

Figura 82 – Medições do avanço em ponte para cada faixa de velocidade de avanço analisada.



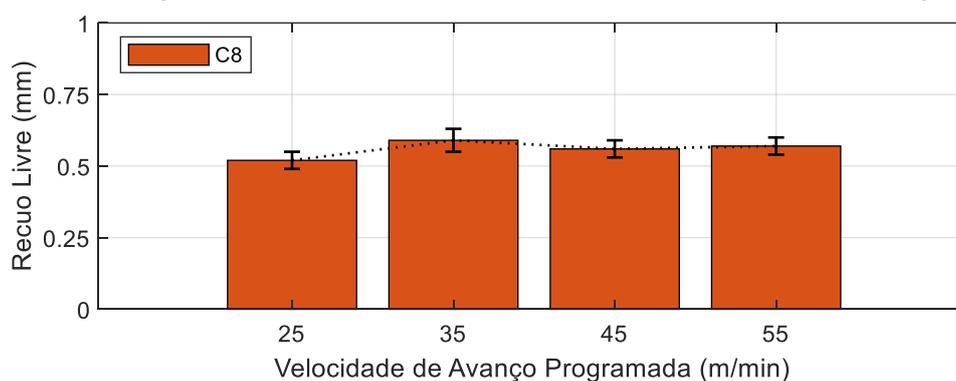
Fonte: Autor.

Para o recuo, ao fim do mergulho e parada do arame, inicia-se o recuo em ponte do arame, que acelera até atingir a máxima velocidade de recuo. Essa

velocidade coincide exatamente com o fim do curto-circuito, conforme mostram os detalhes de 'Fim do Curto-Circuito' na Figura 46. Após a reabertura, o sistema continua recuando o arame até atingir a máxima amplitude de recuo para reiniciar o processo de avanço. Acredita-se que o recuo livre, embora apresente pouca variação tendendo a um valor constante, também esteja relacionado à inércia de desaceleração do servomotor.

Observando os experimentos ao alterar a velocidade de avanço, não foi verificada uma alteração significativa no valor do recuo livre, como mostra a Figura 83. Possivelmente, esta componente está associada a outra variável que não tem correlação com a  $Vd\_sc\_wait$ . No entanto, o mesmo valor foi verificado em toda a faixa analisada, o que indica uma tendência no comportamento dinâmico do recuo livre.

Figura 83 – Medições do recuo livre para cada faixa de velocidade de avanço analisada.

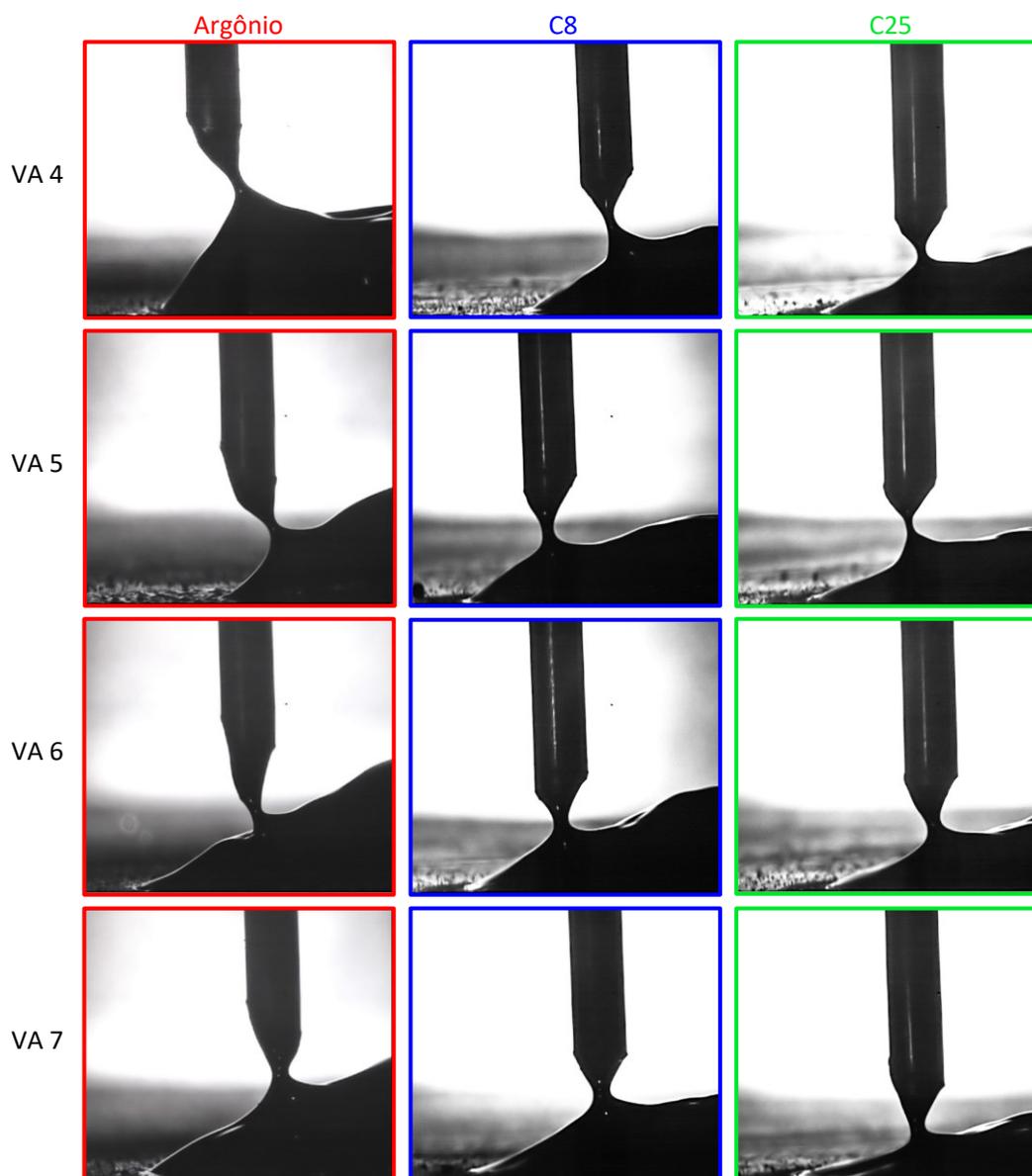


Fonte: Autor.

Um fato interessante é que o recuo do arame promove uma abertura do arco com uma altura relativamente grande em comparação ao processo convencional. Isso ocorre independentemente da intensidade do pulso de corrente, o que resulta em uma redução da densidade de corrente na região. Isso, por sua vez, leva a uma redução significativa da pressão do arco sobre a poça de fusão, o que tende a gerar, entre outras características, baixa diluição e penetração. Esse aspecto é particularmente relevante do ponto de vista da manufatura aditiva.

Outro detalhe observado por meio da filmagem em alta velocidade diz respeito ao alongamento da ponte metálica, o qual varia em função do gás utilizado e da VA. No conjunto amostral analisado, verificou-se um maior alongamento da ponte metálica na iminência do destacamento para o argônio nesta faixa de VA. Este alongamento é ilustrado nos frames a seguir, na Figura 84.

Figura 84 – Alongamento máximo da poça da ponte metálica na iminência do destacamento.



Fonte: Autor.

O alongamento da ponte metálica, neste caso, está intrínseco a tensão superficial da poça de fusão, a qual pode ser considerada função da temperatura e da composição química. O argônio, conforme indicado por Hertel et al. [108] e Kah e Martikainen [109], devido à sua baixa condutividade térmica, não promove um aquecimento tão expressivo da poça em comparação com as misturas contendo  $\text{CO}_2$ . Estas últimas, além de possuírem maior condutividade térmica - o que resulta em um aquecimento mais intenso da poça - também estimulam reações exotérmicas de oxidação da poça devido à presença de oxigênio, uma vez que a presença de também  $\text{CO}_2$  aumenta o potencial de oxidação [112]. Combinados, esses fatores levam a uma

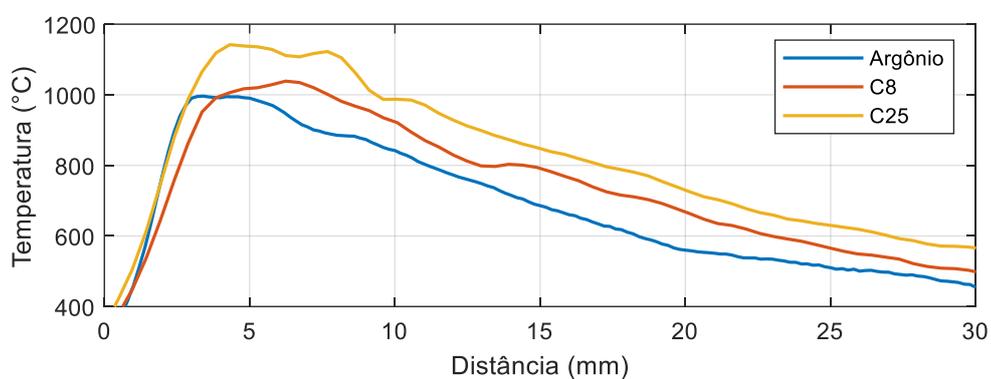
tensão superficial da poça de fusão inferior àquela observada no caso do argônio puro. Os frames adquiridos corroboram com essa hipótese uma vez que é possível verificar, por exemplo, para VA 4 uma diminuição expressiva do alongamento da ponte metálica à medida que se tem o aumento da concentração de CO<sub>2</sub>.

Além disto, vale salientar que para os experimentos com argônio, em especial a VA 4, verificou-se entre outros fenômenos um aumento nos tempos de curto-circuito e arco, possivelmente decorrência do aumento da tensão superficial que resultou em um alongamento demasiadamente elevado da ponte metálica, gerando assim uma reabertura do arco em uma altura elevada, o que incorre em uma maior distância a ser percorrida pelo arame eletrodo para o próximo curto-circuito, aumentando assim o tempo de arco, o período de destacamento e diminuindo a frequência. A diminuição da frequência de destacamento pode gerar uma redução da corrente média e consequentemente da potência, o que gera uma reação em cadeia de diminuição progressiva do aporte de calor e diminuição da temperatura da poça, podendo incorrer nos fenômenos de alongamento da poça observados, os quais dependem da tensão superficial que é uma variável também dependente da temperatura.

Por outro lado, ao aumentar a velocidade de avanço (VA) acima de 5 m/min, ocorre um aumento na corrente média e na potência, o que tende a elevar a temperatura da poça de fusão. Essa elevação pode ser observada indiretamente pela equalização do alongamento da ponte metálica entre as diferentes misturas gasosas, conforme demonstrado no gráfico de recuo em ponte da Figura 79.

Para verificar a hipótese mencionada, foram conduzidos testes utilizando filmagem infravermelha para a faixa de VA de 5 m/min, conforme descrito na metodologia. Os perfis térmicos obtidos para os três gases confirmam as hipóteses sugeridas, como ilustram as curvas na Figura 85. Ao calcular o gradiente térmico a partir da temperatura de 1000 °C ao longo de 20 mm, obteve-se 21,5 °C/mm para o argônio, 17,1 °C/mm para o C8 e 13,3 °C/mm para o C25. O maior gradiente térmico indica uma temperatura menor em um mesmo ponto, ou seja, o cordão depositado com argônio apresentou temperaturas inferiores às dos cordões soldados com C8 e C25. Esta menor temperatura corroborou com os resultados obtidos na análise do alongamento da ponte metálica realizada com o uso de filmagens em alta velocidade.

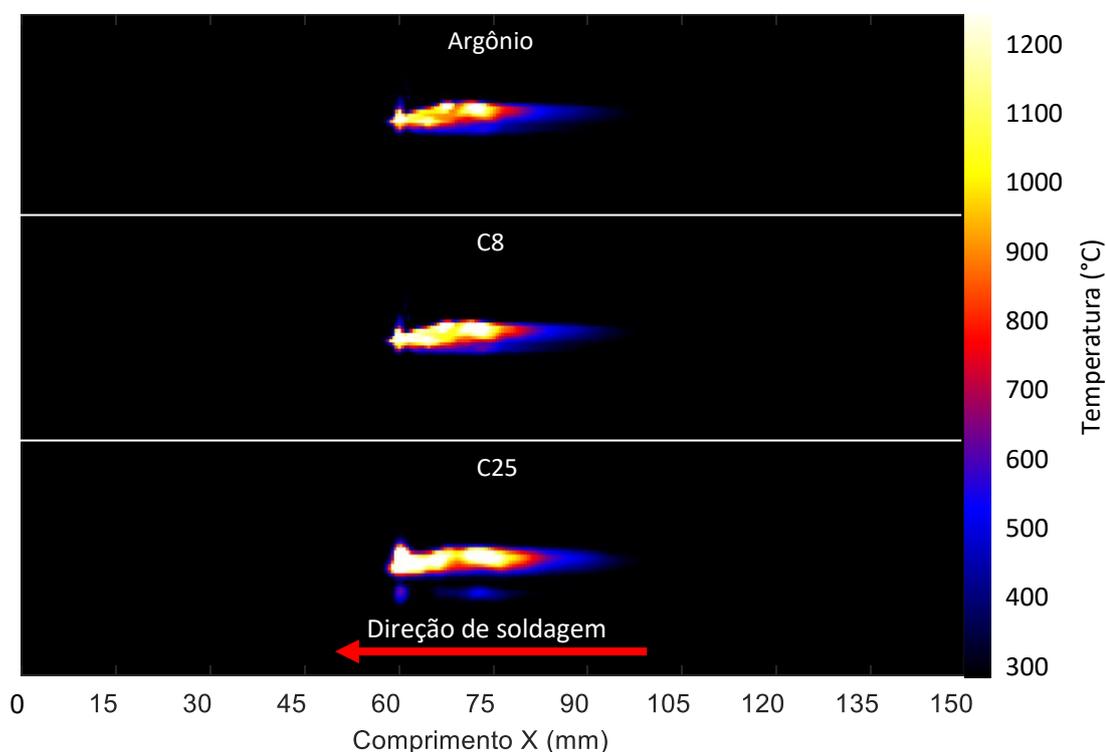
Figura 85 – Gradiente térmico obtido com os três gases de proteção para a faixa de VA de 5 m/min.



Fonte: Autor.

Para ilustrar os resultados obtidos, foram retiradas imagens do software de análise da câmera térmica no exato momento da medição de temperatura do cordão para cada proteção gasosa evidenciando em cores as isotermas e diferenças de temperatura entre si. As imagens são exibidas na Figura 86.

Figura 86 – Imagem em infravermelho captada pela câmera térmica.



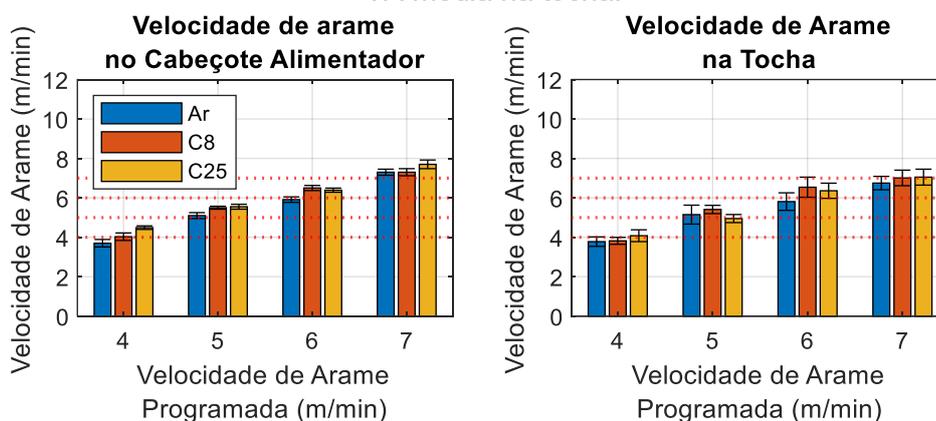
Fonte: Autor.

Outro detalhe observado refere-se a ruptura da ponte metálica para o gás argônio nas faixas de VA de 4 e 5 m/min, que ocorre em uma altura de arco maior que

os demais gases devido ao excessivo recuo, sendo assim, o pulso de corrente subsequente, mesmo apresentado o mesmo valor, tende a apresentar uma densidade de corrente inferior aos demais. Esta redução na densidade de corrente em função da altura do arco gera uma redução da pressão do arco sobre a poça o que somado às características físicas do argônio, pode contribuir para uma redução da penetração, diluição e produzir cordões excessivamente convexas, como será discutido a posteriori.

Observando os valores médios da VA tanto para o cabeçote alimentador como para a tocha é possível perceber uma coerência entre os valores programados e os valores adquiridos, e com relativa baixa incerteza. A VA média resultante na tocha, calculada por meio da média da curva de velocidade instantânea, exibiu valores médios levemente menores que os lidos no cabeçote, contudo, dentro da incerteza calculada, como mostram os gráficos da Figura 87.

Figura 87 – Comparação da VA média medida no cabeçote alimentador (Bloco de Rolete) e VA média na tocha.



Fonte: Autor.

A velocidade média de arame na tocha bem como do processo é ditada predominantemente pela velocidade de avanço e amplitude de avanço, uma vez que foram os únicos dados que apresentam variação significativa dentre os demais. Os gráficos da Figura 80 mostram a diferenciação entre as curvas de velocidade instantânea à medida que se aumenta a VA para a amostra com a mistura gasosa C8. Vale salientar que os demais gases apresentaram o mesmo comportamento. Este comportamento da VA instantânea aliado à forma de onda de corrente oferece, portanto, alterações sobre o diâmetro de gota praticado por cada faixa de VA

programada, uma vez que não se pode afirmar que há diferença entre os períodos de transferência.

Por fim, o resultado gerado pela composição da forma de onda de corrente, comportamento dinâmico da oscilação do arame e mistura gasosa repousa sobre a aparência superficial e geometria do cordão de solda.

O resultado referente a aparência superficial mostra cordões depositados convexos e escamados para o argônio e cordões moderadamente molhados e lisos para as misturas C8 e C25, porém, para o C25 foi observado ilhas de sílica na superfície e nos flancos dos cordões, conforme mostram as fotos na Figura 88.

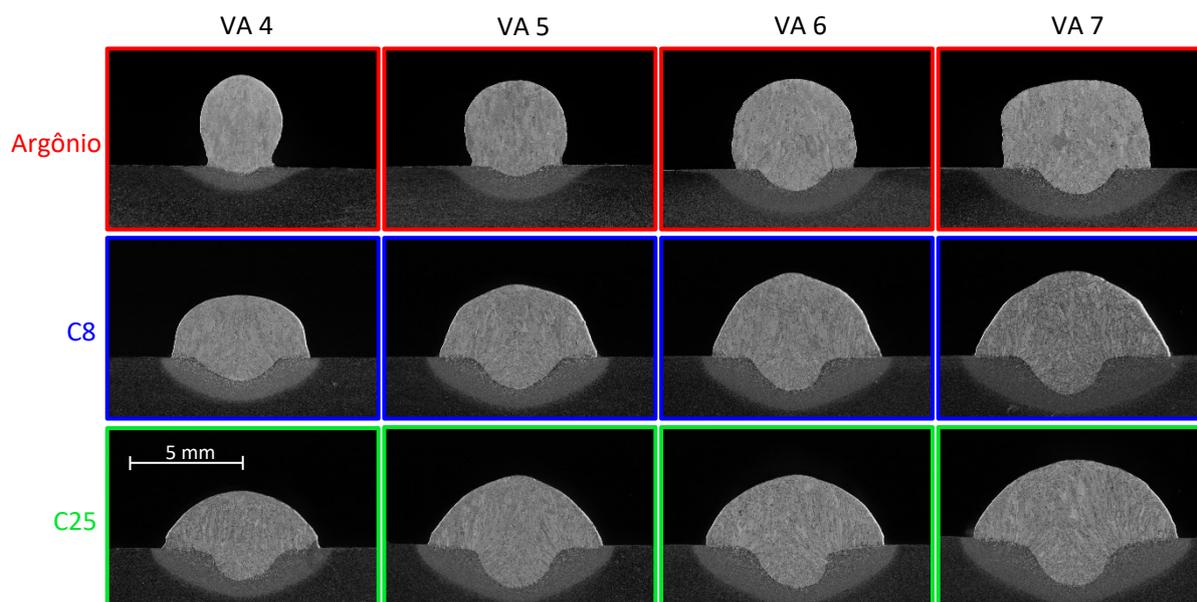
Figura 88 – Aparência superficial dos cordões depositados.



Fonte: Autor.

Por meio de ensaios de macrografias, estes presentes na Figura 89, não foi verificado nenhum defeito interno, porém foi observado uma diminuição significativa na convexidade e altura dos cordões e um aumento na penetração, largura e diluição à medida que se aumenta a quantidade de  $\text{CO}_2$  na mistura gasosa.

Figura 89 – Macrografias dos cordões depositados.



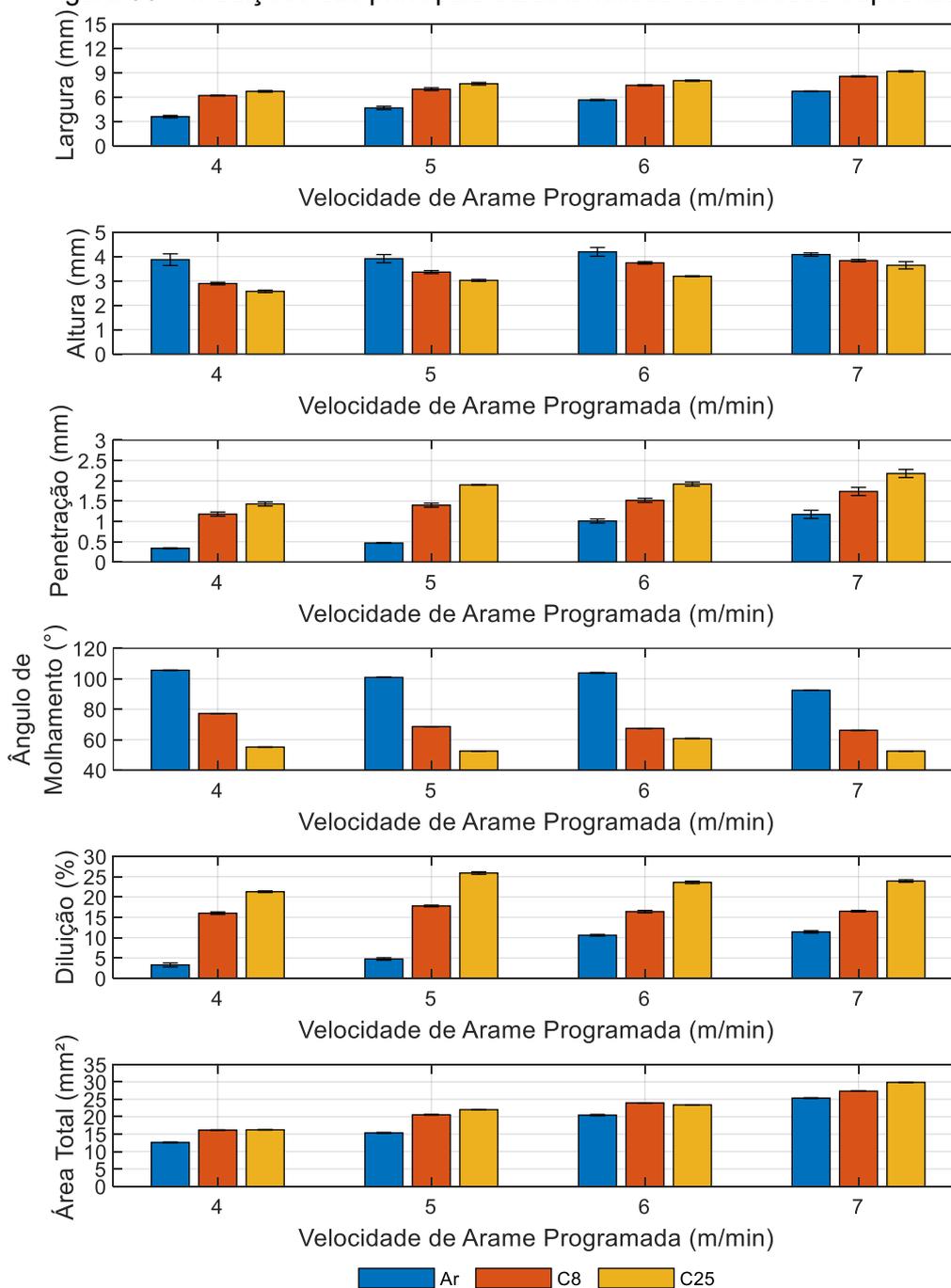
Fonte: Autor.

As medições das macros apresentadas nos gráficos da Figura 90 indicam que a mistura gasosa, em específico a quantidade de  $\text{CO}_2$ , possui uma influência significativa sobre a geometria do cordão mesmo mantendo constante parâmetros como VA e forma de onda de corrente. Estas alterações são reflexo direto das características físicas de interação do gás de proteção com o meio. Para o argônio, por exemplo, é possível verificar cordões altos e estreitos, com baixa molhabilidade, diluição e aparência convexa. Estas características, em especial a excessiva convexidade, do ponto de vista da manufatura aditiva não são aprazíveis, pois baixa molhabilidade tende a dificultar a sobreposição horizontal de cordões, uma vez que a tendência de sobreposição incompleta nos flancos é elevada [6, 14, 15, 27]. Por outro lado, para o C25 verificou-se cordões baixos e largos com maior penetração, diluição e molhamento em relação aos demais. Para o C8 foi observado características intermediárias entre o argônio e C25. Além disso, verifica-se uma variação relevante na área fundida ou área total, o que demonstra uma variação na taxa de deposição em função do gás de proteção para uma mesma velocidade de arame programada.

Em síntese, considerando não só a geometria dos cordões e aparência superficial, mas também a estabilidade do processo bem como todas as suas características dinâmicas de transferência metálica definiu-se o gás C8, dentre as misturas analisadas, como a mistura gasosa mais adequada para as operações de manufatura aditiva utilizando aço como matéria-prima e o CMT, pois oferece além de

maior estabilidade em relação as demais, cordões com moderada penetração e uma forma equilibrada em termos de altura, largura, molhabilidade tanto para operações com cordões simples como sobreposições. Portanto, a partir deste ponto, todos os ensaios foram realizados com C8 como mistura gasosa

Figura 90 – Medições das principais características dos cordões depositados.



Fonte: Autor.

## 5.2 MAPEAMENTO E ANÁLISE DO PROCESSO COM VISTAS NA MANUFATURA ADITIVA

Nesta subseção serão tratados os resultados referentes ao mapeamento da variante CMT do processo GMAW através da alteração da velocidade de deslocamento (VD) e distância bico de contato peça (DBCP) para uma faixa de VA programada de 4 a 7 m/min. O mapeamento do processo consistiu em analisar a influência destas variáveis sobre os parâmetros de soldagem, isto é, velocidade de alimentação, corrente e tensão. Além disto, foi também observada a influência destas variáveis sobre a geometria do cordão sob a ótica da manufatura aditiva visando o desenvolvimento de um algoritmo de seleção de parâmetros. Os resultados referentes a VA e as demais componentes elétricas do processo estão descritas na Tabela 17, a seguir.

Tabela 17 – Medições dos parâmetros de soldagem referentes aos experimentos alterando a velocidade de arame, DBCP e velocidade soldagem.

ID	VA Prog. (m/min)	DBCP (mm)	VD (cm/min)	VA Real (m/min)	Inc. VA (m/min)	Corrente Média (A)	Inc. Corrente (A)	Tensão Média (V)	Inc. Tensão (V)	Potência (kW)	Inc. Potência (kW)	Aporte Térmico (J/mm)	Taxa de Deposição (kg/h)	Tempo de Curto-circuito (ms)	Tempo de Arco (ms)	Frequência (Hz)
E01	4	10	30	3.6	0.1	142	4	13.3	0.3	2.4	0.04	474	3.2	4.7	6.1	93
E02			45	3.4	0.2	141	4	13.0	0.3	2.3	0.04	308	3.0	4.5	5.8	97
E03			60	3.6	0.1	143	2	12.9	0.2	2.4	0.03	240	3.2	4.4	5.7	99
E04			75	3.6	0.1	141	2	13.1	0.2	2.4	0.02	188	3.2	4.7	6.0	93
E05		15	30	4.0	0.1	140	3	13.7	0.2	2.4	0.03	488	3.5	4.8	6.2	91
E06			45	4.0	0.2	142	3	13.6	0.3	2.4	0.04	324	3.5	4.6	6.1	94
E07			60	4.0	0.1	141	2	13.7	0.2	2.4	0.03	244	3.5	4.4	5.9	97
E08			75	3.9	0.1	139	3	13.5	0.2	2.4	0.03	194	3.4	4.7	6.1	93
E09		20	30	4.8	0.1	142	2	15.3	0.4	2.6	0.04	516	4.2	4.9	6.5	88
E10			45	4.5	0.1	141	2	14.6	0.2	2.6	0.02	343	4.0	4.2	5.9	99
E11			60	4.6	0.1	140	3	14.6	0.2	2.6	0.04	258	4.1	4.4	6.1	96
E12			75	4.5	0.3	139	6	14.1	0.5	2.6	0.07	205	4.0	4.5	6.2	94
E13	5	10	30	4.0	0.1	166	3	13.4	0.3	2.7	0.04	540	3.5	4.5	5.6	99
E14			45	4.2	0.1	167	2	13.3	0.2	2.6	0.03	352	3.7	4.4	5.4	102
E15			60	4.3	0.1	166	1	13.2	0.2	2.6	0.02	263	3.8	4.4	5.5	101
E16			75	4.1	0.1	166	1	13.2	0.2	2.6	0.02	208	3.6	4.4	5.5	101
E17		15	30	4.6	0.2	164	4	14.5	0.2	2.8	0.03	560	4.1	4.5	5.7	98
E18			45	4.7	0.1	165	2	13.8	0.2	2.7	0.02	365	4.1	4.4	5.6	100
E19			60	4.8	0.1	165	1	14.2	0.2	2.8	0.02	278	4.2	4.3	5.5	102
E20			75	4.7	0.1	163	1	13.8	0.3	2.7	0.03	217	4.1	4.3	5.5	102
E21	20	30	5.3	0.2	163	4	16.2	0.3	3.0	0.04	608	4.7	4.3	6.1	97	
E22		45	5.6	0.1	165	3	15.5	0.3	3.0	0.04	400	4.9	4.1	5.8	101	
E23		60	5.4	0.1	165	1	16.1	0.3	3.0	0.03	304	4.8	3.9	5.7	104	
E24		75	5.5	0.1	164	2	16.0	0.2	3.0	0.02	241	4.9	4.1	5.7	101	

E25	6	10	30	5.0	0.2	187	2	13.7	0.3	2.9	0.03	576	4.4	4.8	5.4	98
E26			45	4.7	0.1	191	1	13.2	0.3	2.8	0.03	372	4.1	4.9	5.4	97
E27			60	4.8	0.1	191	1	13.3	0.3	2.8	0.03	276	4.2	4.9	5.4	97
E28			75	4.7	0.1	191	1	12.4	0.3	2.7	0.03	218	4.1	4.9	5.4	97
E29		15	30	5.8	0.3	191	3	14.6	0.3	3.1	0.03	622	5.1	4.8	5.8	95
E30			45	5.8	0.1	192	2	14.4	0.2	3.0	0.03	405	5.1	4.7	5.7	97
E31			60	5.9	0.1	190	2	14.5	0.2	3.1	0.03	307	5.2	4.7	5.7	97
E32			75	5.5	0.1	189	1	13.9	0.2	2.9	0.02	235	4.9	4.6	5.5	99
E33		20	30	6.8	0.1	185	2	16.7	0.6	3.3	0.05	654	6.0	4.5	6.0	96
E34			45	6.7	0.1	189	2	16.5	0.4	3.4	0.04	448	5.9	4.2	5.8	100
E35			60	6.6	0.1	187	2	16.2	0.2	3.3	0.03	332	5.8	4.4	5.7	99
E36			75	6.8	0.1	188	1	16.3	0.2	3.3	0.02	266	6.0	4.4	5.7	99
E37	7	10	30	5.8	0.2	210	2	13.4	0.2	3.3	0.02	656	5.1	4.8	5.6	96
E38			45	5.5	0.1	212	1	13.8	0.2	3.2	0.02	423	4.9	4.9	5.7	95
E39			60	5.3	0.1	211	1	13.6	0.2	3.1	0.03	310	4.7	4.9	5.5	96
E40			75	5.0	0.1	211	1	13.2	0.2	3.8	0.02	304	4.4	4.9	5.6	96
E41		15	30	6.8	0.2	210	2	15.3	0.2	3.6	0.03	710	6.0	4.5	5.9	96
E42			45	6.7	0.1	210	1	15.2	0.2	3.5	0.03	469	5.9	4.4	5.7	99
E43			60	6.6	0.1	209	2	15.2	0.2	3.5	0.03	350	5.8	4.6	5.8	97
E44			75	6.4	0.1	207	2	14.9	0.2	3.4	0.02	275	5.6	4.6	5.6	99
E45	20	30	7.8	0.2	204	3	17.3	0.3	4.0	0.05	796	6.9	4.5	6.1	95	
E46		45	7.6	0.1	201	2	18.3	0.2	4.0	0.03	539	6.7	4.4	5.9	98	
E47		60	7.6	0.2	202	3	18.1	0.3	4.0	0.04	402	6.7	4.2	5.8	100	
E48		75	7.5	0.1	201	2	17.9	0.2	4.0	0.03	321	6.6	4.3	5.9	98	

Fonte: Autor.

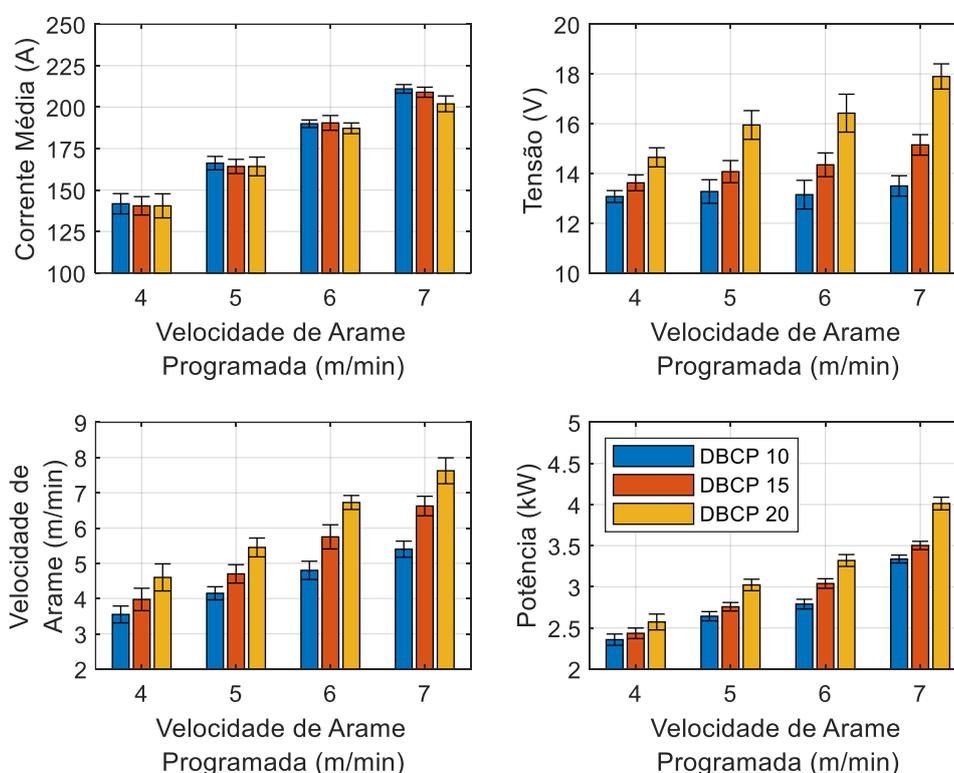
Analisando os dados foi possível verificar que a velocidade de deslocamento não afeta de forma significativa (*valores-p* > 0,05) a velocidade de alimentação, a corrente e a tensão, apresentando maior influência sobre a geometria do cordão, conforme será discutido ao longo da presente seção. Portanto, para as análises subsequentes, devido à invariabilidade dos dados em função da velocidade de deslocamento, optou-se por utilizar os dados referentes as diferentes VAs programadas e DBCPs para a VD de 60 cm/min. A análise concernente a influência da VD sobre os aspectos geométricos será abordada posteriormente.

Vale destacar que, por se tratar de um sistema em malha fechada com operações sinérgicas, as variações na tensão são precedidas de variações na velocidade de arame, as quais também serão discutidas *a posteriori*.

### 5.2.1 Influência da DBCP na velocidade alimentação

Dentre as variáveis observadas foi possível verificar que a DBCP exerce um efeito significativo sobre a tensão média e a velocidade de arame real em relação a programada. Esse comportamento é decorrente do modo de operação da fonte de soldagem, que, por operar em modo de corrente constante, permite que a tensão varie em função de algumas variáveis, sobretudo a DBCP, como mostram os gráficos da Figura 91. Nestes gráficos, é evidenciado o comportamento constante da corrente, o aumento da tensão, potência e da VA em função da DBCP.

Figura 91 – Corrente, tensão e velocidade de arame média em função da DBCP.



Fonte: Autor.

A tensão média de soldagem ( $U_m$ ) pode ser interpretada, segundo a primeira lei de Ohm, como o média do produto entre a corrente de soldagem ( $I$ ) e a impedância do sistema ( $Z$ ) em um determinado período amostral ( $n$ ), conforme expressa a equação (21).

$$U_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_i \cdot Z_i \quad (21)$$

Neste caso, uma vez que o arranjo experimental foi o mesmo para todos os experimentos pode-se desconsiderar a impedância associada à peça e aos cabos do mangote e obra. Portanto, considerando apenas o eletrodo e o arco como as componentes de maior relevância no sistema e em uma associação em série, é possível inferir que a variação ou aumento da DBCP interfere na impedância equivalente desta associação, eletrodo e arco, e promove, efetivamente, um aumento dos valores de tensão média lidos. Sendo assim, a impedância relativa à DBCP, na fase de arco, pode ser lida como a composição entre as impedâncias referentes ao *stick-out* e a altura do arco.

Segundo Scotti e Ponomarev [113] para uma fonte de operando em modo de corrente constante e com velocidade de alimentação também constante o aumento da DBCP tende a produzir leituras de tensão maiores e arcos mais longos, devido a influência do efeito joule sobre o eletrodo, que tende a gerar maior aquecimento do eletrodo e por consequência maior taxa de fusão. Este aumento da taxa de fusão devido a contribuição do efeito Joule pode ser explicar pela equação geral do consumo, a qual foi inicialmente descrita por Lesnewich [114]. A equação do consumo expressa que a taxa de fusão do arame ocorre a partir de duas fontes principais de energia térmica, arco e efeito joule [115], conforme expressa a equação (22).

$$C = \alpha \cdot I + \beta \cdot L_s \cdot I^2 \quad (22)$$

A primeira parte desta equação descreve a contribuição do aquecimento anódico na extremidade do eletrodo, representado pelo produto da corrente média e  $\alpha$  ( $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{A}^{-1}$ ), que é a constante de aquecimento devido ao arco. A segunda parte da equação representa a contribuição do efeito joule para a fusão do arame, através do produto do *stick-out* (mm) representado pelo  $L_s$ , o quadrado da corrente média ( $I^2$ ) e a constante  $\beta$  ( $\text{s}^{-1} \cdot \text{A}^{-2}$ ), que expressa a contribuição da resistividade para a fusão do arame. Ambos  $\alpha$  e  $\beta$  são constantes empíricas que dependem do material. Para o arame de aço ER70S6, de acordo com Allum e Quintino [116] e Cuiuri [117], os valores adotados foram  $0,27 \text{ mm s}^{-1} \cdot \text{A}^{-1}$  e  $5,9 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1} \cdot \text{A}^{-2}$ , respectivamente.

Esta forma de expressar a taxa de fusão de arame é específica para formas de onda sem curtos-circuitos. No entanto, é possível adaptá-la para considerar operações com curto-circuito, para isto é essencial compreender a contribuição de

cada termo. O primeiro termo descreve o aquecimento anódico. Durante o curto-circuito, este termo não influencia a taxa de fusão. Portanto, utilizar a corrente média para calcular o consumo médio resultará em um erro, uma vez que o curto-circuito contribui significativamente para a corrente média. Assim, o parâmetro que realmente contribui para a taxa de fusão será apenas a corrente média durante a fase de arco, a qual é dado pela equação (23) [113, 117].

$$\bar{I}_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{1}{t_{i-1} - t_i} \int_{t_{i-1}}^{t_i} I(t) dt \right) \quad (23)$$

No segundo termo da equação, que expressa a contribuição do efeito joule para a fusão do arame, a corrente média também pode introduzir erros devido à forma de onda não constante. Neste contexto, a corrente eficaz, expresso pela equação (27), é o parâmetro mais adequado [113, 117].

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{i=0}^T I_i^2} \quad (24)$$

Substituindo as variáveis na equação (22) obteve-se a equação (25), a qual permite uma avaliação média da taxa de fusão de arame para o modo de transferência por curto-circuito.

$$C_{cc} = \alpha \cdot \bar{I}_a + \beta \cdot L_s \cdot I_{rms}^2 \quad (25)$$

Analisando a equação (25), é possível inferir que em um processo operando com corrente média constante, o único termo que pode aumentar a taxa de fusão é o *stick-out*. Observando os dados obtidos experimentalmente, é possível verificar que tanto a corrente média do arco quanto a corrente eficaz permanecem constantes, mesmo alterando a DBCP, conforme mostra a Tabela 18.

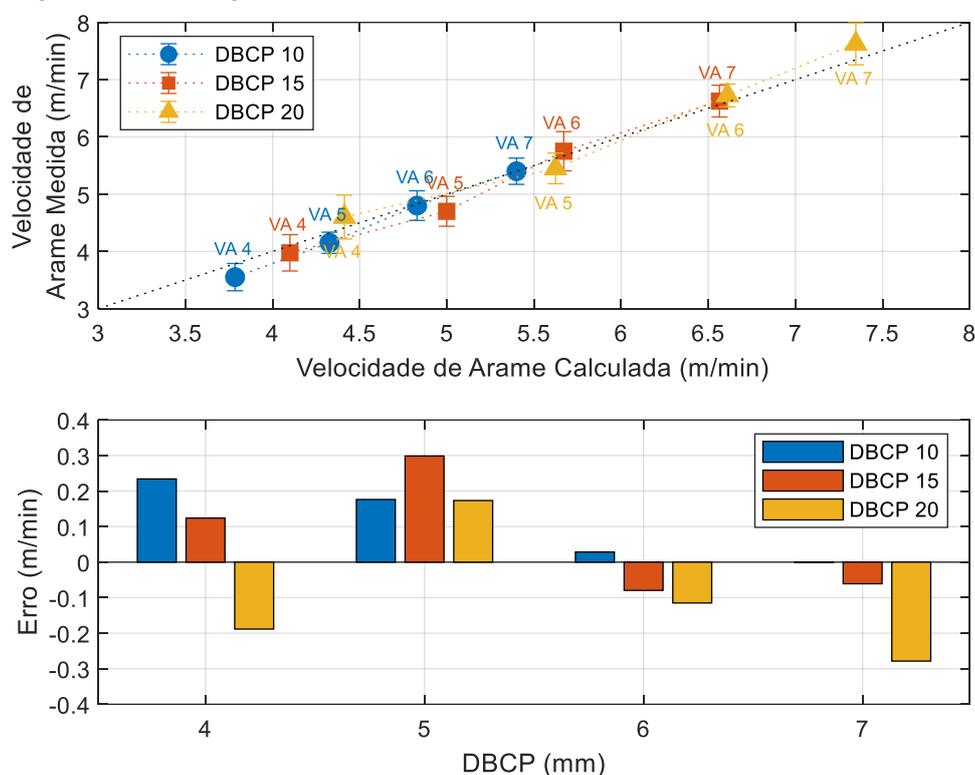
Tabela 18 – Corrente média de arco e corrente eficaz em função da VA e DBCP.

VA \ DBCP	Corrente média de Arco (A)			Corrente Eficaz (A)		
	10	15	20	10	15	20
4	179	172	162	174	167	166
5	198	195	192	196	198	197
6	209	205	206	223	224	225
7	226	229	218	245	247	243

Fonte: Autor.

Ao aplicar a equação (25) aos dados descritos na Tabela 18, considerando o *stick-out* como a diferença entre a DBCP e a altura da poça de fusão, obteve-se o gráfico mostrado na Figura 92.

Figura 92 – Relação entre VA medida e calculada para as diferentes DBCPs.



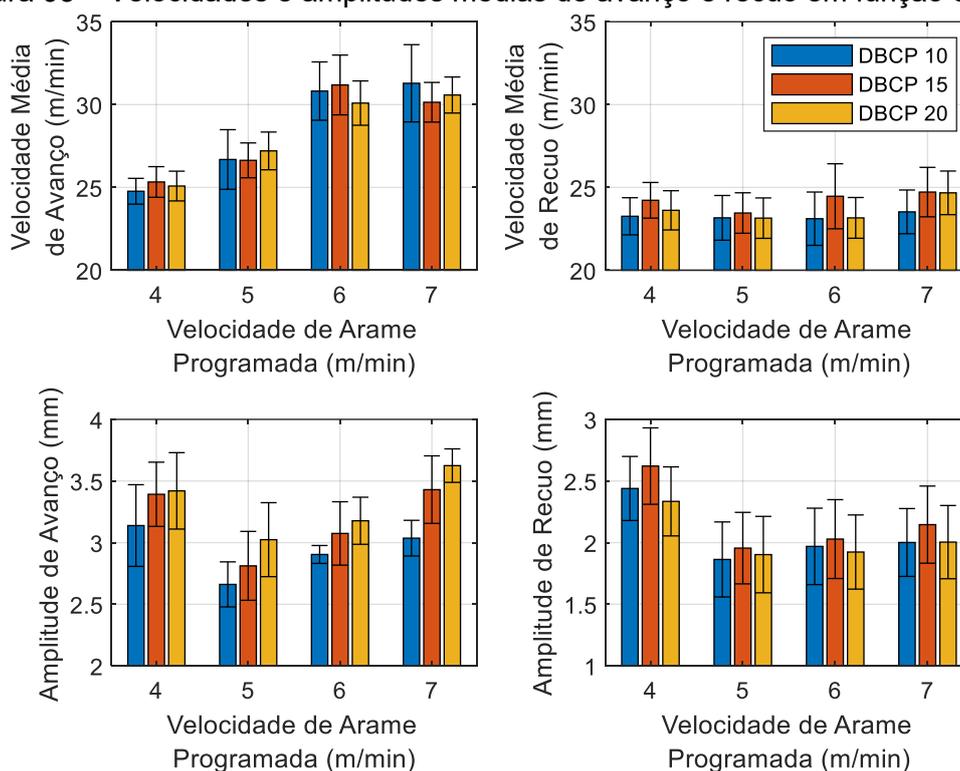
Fonte: Autor.

Analisando os resultados apresentados no gráfico, foi observado que o *stick-out* exerce uma influência significativa no aumento da taxa média de fusão do arame. Além disso, a adaptação da equação geral do consumo para o curto-circuito é uma métrica funcional, apesar da presença de um pequeno erro, para calcular a taxa de consumo em operações de soldagem assistidas pelo modo de transferência por curto-circuito e curto-circuito controlado, mais especificamente na variante CMT.

Apesar dos dados de consumo satisfazerem as velocidades médias de alimentação, é crucial compreender que na variante CMT, como observado, a transferência metálica sendo eletromecanicamente controlada, a velocidade real do arame pode atingir valores de até 60 m/min na fase de avanço e 40 m/min na fase de recuo, conforme visto no item 5.1.3. Sendo assim, é pertinente buscar compreender o que de fato é modificado na dinâmica da transferência para que ocorra este aumento médio na taxa de deposição.

Analisando inicialmente as variáveis que compõem a dinâmica de transferência - ou seja, as velocidades e amplitudes médias de avanço e recuo em função da DBCP para cada conjunto de VA - foi possível verificar que a única variável que apresentou uma variação relevante, em comparação com as demais, foi a amplitude de avanço, conforme demonstram os gráficos da Figura 93.

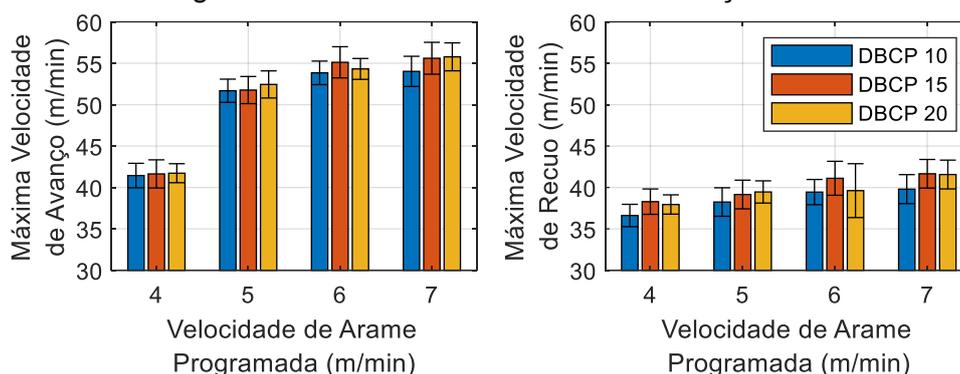
Figura 93 – Velocidades e amplitudes médias de avanço e recuo em função da DBCP.



Fonte: Autor.

Ao observar a velocidade máxima alcançada durante as fases de avanço e recuo, não foi identificada nenhuma variação significativa em relação à alteração da DBCP, apesar da mesma apresentar alguma variação, como ilustrado nos gráficos da Figura 94.

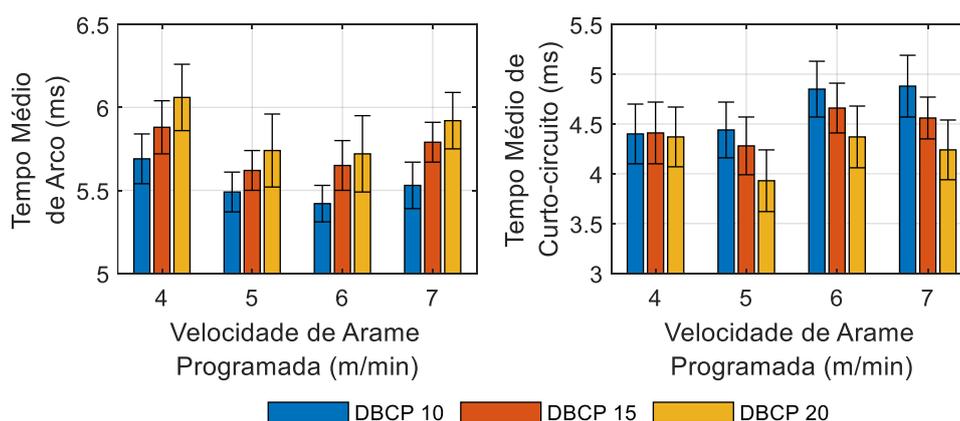
Figura 94 – Máximas velocidades de avanço e recuo.



Fonte: Autor.

Dado o aumento da velocidade média de alimentação devido ao aumento da DBCP e stick-out, e considerando que, entre as variáveis que afetam o movimento do arame, apenas a amplitude de avanço demonstrou variação, é coerente esperar um incremento do tempo médio de arco, uma vez que, a distância percorrida em uma mesma velocidade foi maior. Ao analisar os dados e observar o tempo médio de arco, foi possível verificar um aumento desta variável em função da DBCP. Como a amplitude do recuo, bem como sua velocidade, foram mantidas, na média, constantes, é possível inferir que houve uma maior fusão do arame. Isso elevou a distância entre a extremidade da gota e a poça de fusão, bem como o tempo de arco. Por outro lado, verificou-se uma diminuição do tempo médio de curto-circuito. Conforme mostrado nos gráficos da Figura 95.

Figura 95 – Tempo médio de arco e curto-circuito.

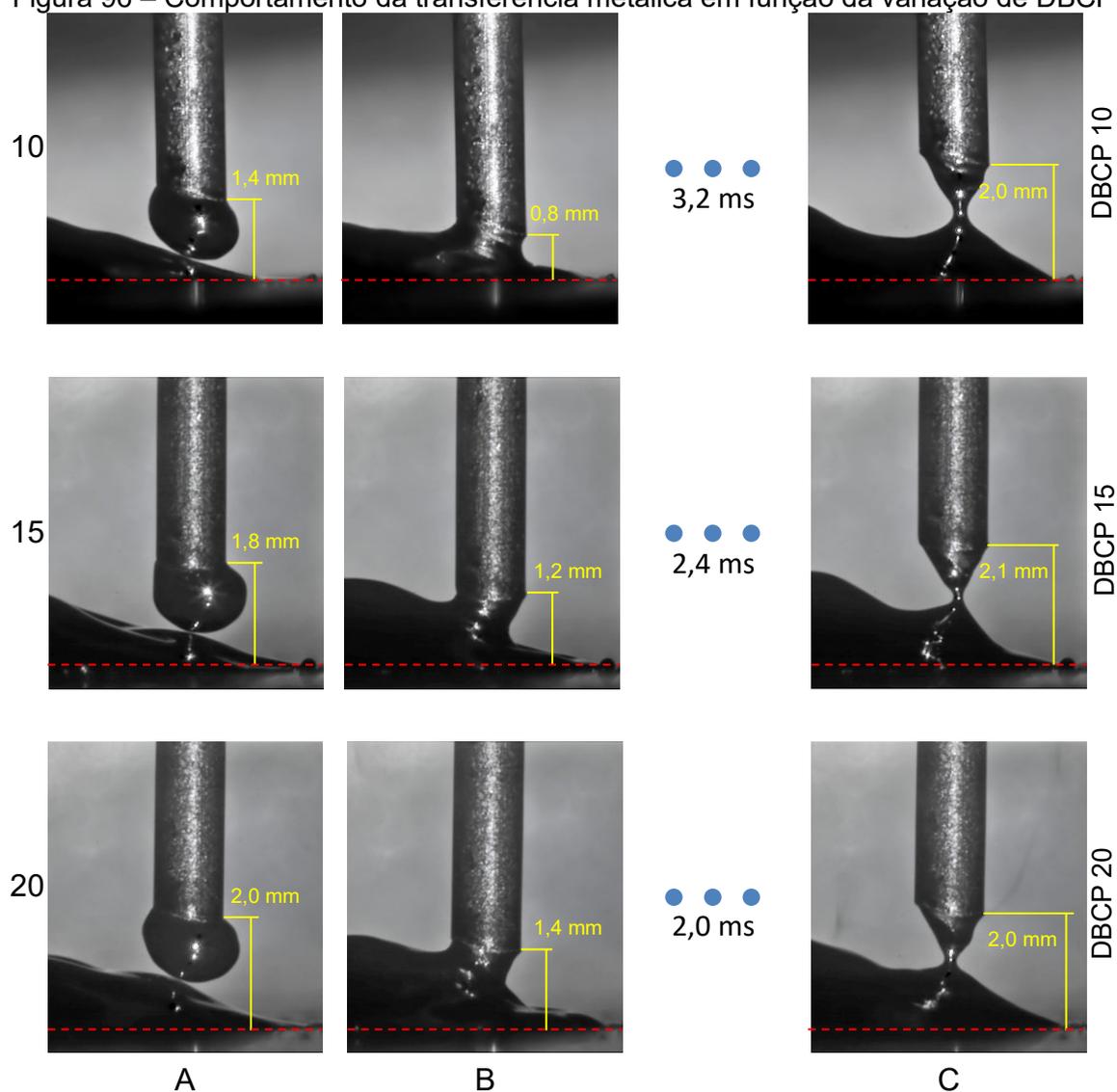


Fonte: Autor.

A redução do tempo de curto-circuito com o aumento da DBCP pode ser explicada ao se observar o mergulho do arame em direção à poça de fusão. A Figura 96 ilustra este fenômeno com frames selecionados de uma filmagem em alta

velocidade, usando uma VA programada de 6 m/min, para as DBCPs de 10, 15 e 20 mm. É possível observar na coluna A uma variação do diâmetro da gota com a DBCP. Adicionalmente, verifica-se um mergulho de 0,6 mm para todas as condições. Essa constância no mergulho (resultado da dinâmica de desaceleração do servomotor) resulta em um mergulho ou contato menor para gotas de maior diâmetro. Esse fenômeno leva a um aumento na altura da ponte metálica à medida que se aumenta a DBCP, como demonstrado nos frames da coluna B.

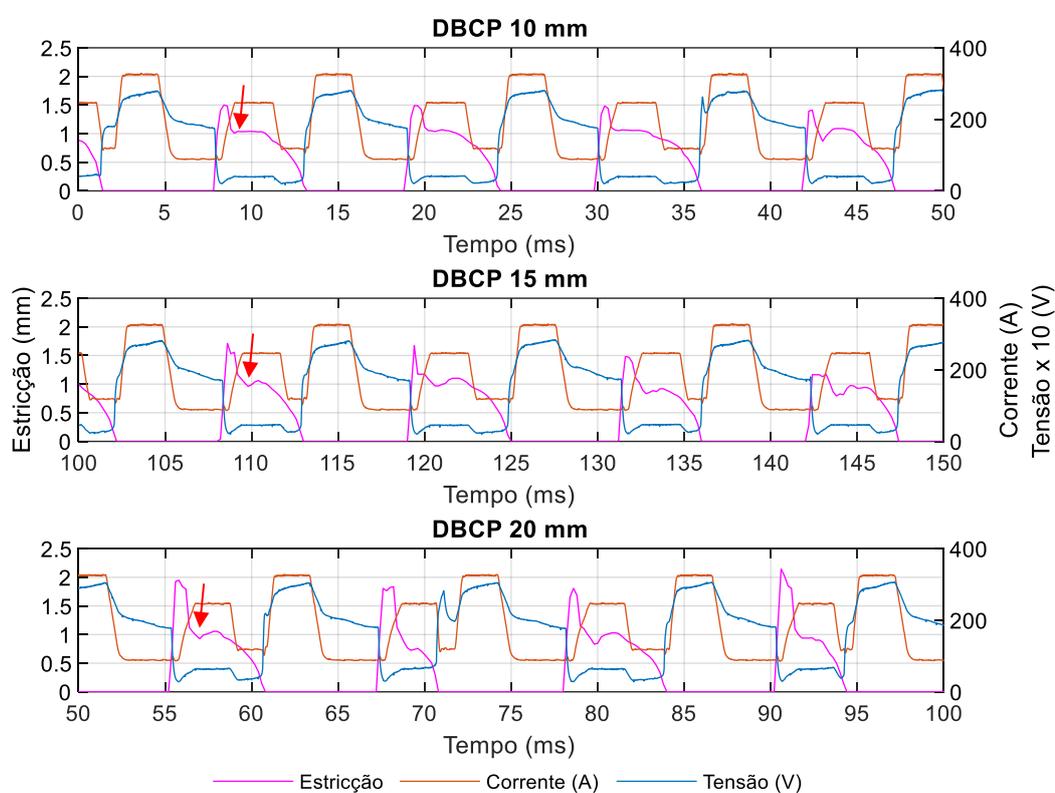
Figura 96 – Comportamento da transferência metálica em função da variação de DBCP.



Fonte: Autor.

Portanto, o aumento da altura da ponte metálica devido à DBCP tende a favorecer o processo de estricção, devido a ação da força de tensão superficial e efeito *pinch*, devido a ação das forças eletromagnéticas, gera-se uma coesão rápida da gota pela poça e um pré-estriccionamento da ponte, conforme ilustra a coluna B. Sendo assim, esse efeito tende a exigir menos alongamento da ponte metálica para sua ruptura e, conseqüentemente, menos tempo, considerando que a taxa de estricção é, aparentemente, constante. Conforme ilustrado nos gráficos da coluna C e Figura 97, que mostram os valores instantâneos de estricção, medidos por meio de análise de imagem.

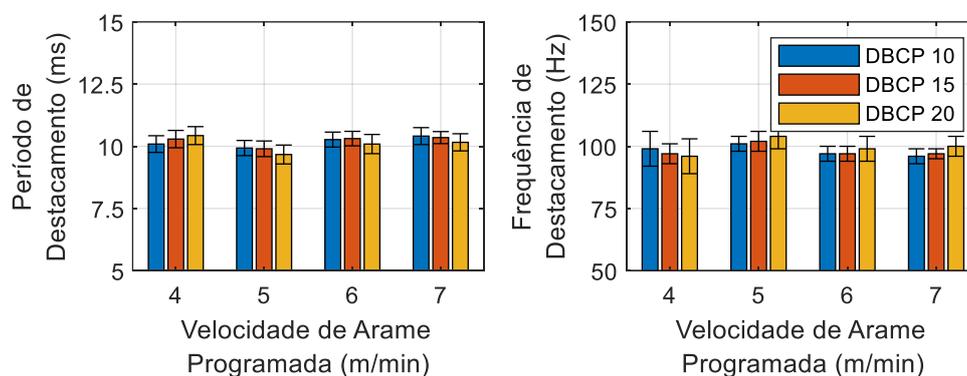
Figura 97 – Comportamento da estricção em função do tempo.



Fonte: Autor.

Devido ao aumento do tempo de arco e à diminuição do tempo de curto-circuito, a frequência de destacamento manteve-se, na média, semelhante, em torno de 98 Hz, apresentando um leve aumento para a DBCP de 20 mm, como ilustram os gráficos da Figura 98.

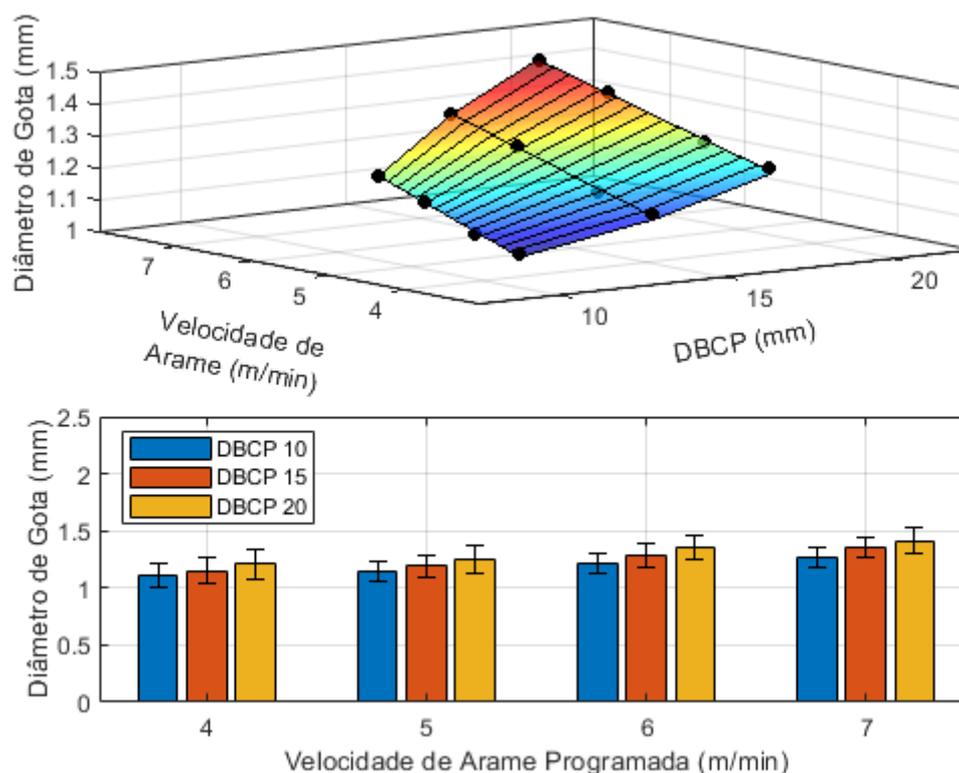
Figura 98 – Período e frequência de destacamento em função da DBCP para cada VA programada.



Fonte: Autor.

Com o aumento da taxa de fusão e, conseqüentemente, da velocidade com que o arame é fundido, surge uma componente de velocidade relativa. Portanto, é correto afirmar que a velocidade de avanço relativa é o resultado da velocidade de avanço absoluta subtraindo-se a velocidade com que o arame é fundido. Essa redução na velocidade de avanço resulta em uma distância maior entre a extremidade da gota e a poça de fusão, o que implica em uma amplitude de avanço e tempo de arco maiores, além de uma gota maior e conseqüentemente maior taxa de fusão. Os diâmetros de gota medidos em função da DBCP para cada VA, seguindo a metodologia, são apresentados nos gráficos da Figura 99.

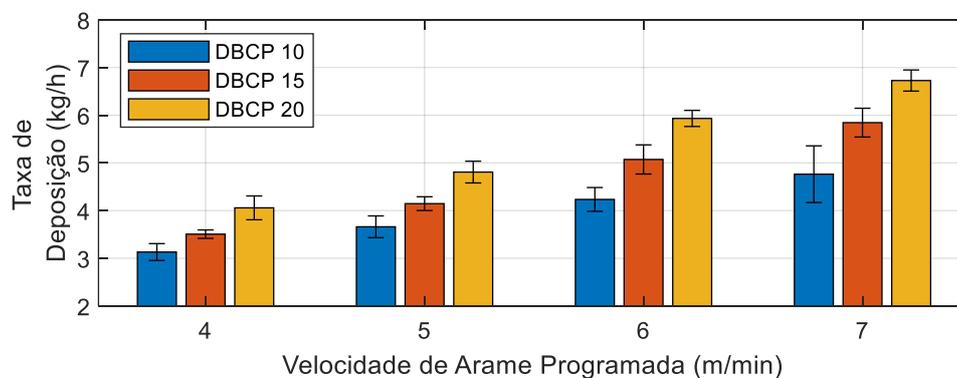
Figura 99 – Diâmetro de gota em função da DBCP para cada VA programada.



Fonte: Autor.

Portanto, é possível concluir que a DBCP influencia significativamente na velocidade de alimentação do arame, promovendo, devido ao aumento do tempo de arco, um aumento do diâmetro de gota e, na média, da taxa de deposição (Figura 100), uma vez que o arco é um mecanismo mais eficiente para fusão do arame em relação ao efeito Joule (Curto-circuito).

Figura 100 – Taxa de deposição em função da DBCP para cada VA programa.

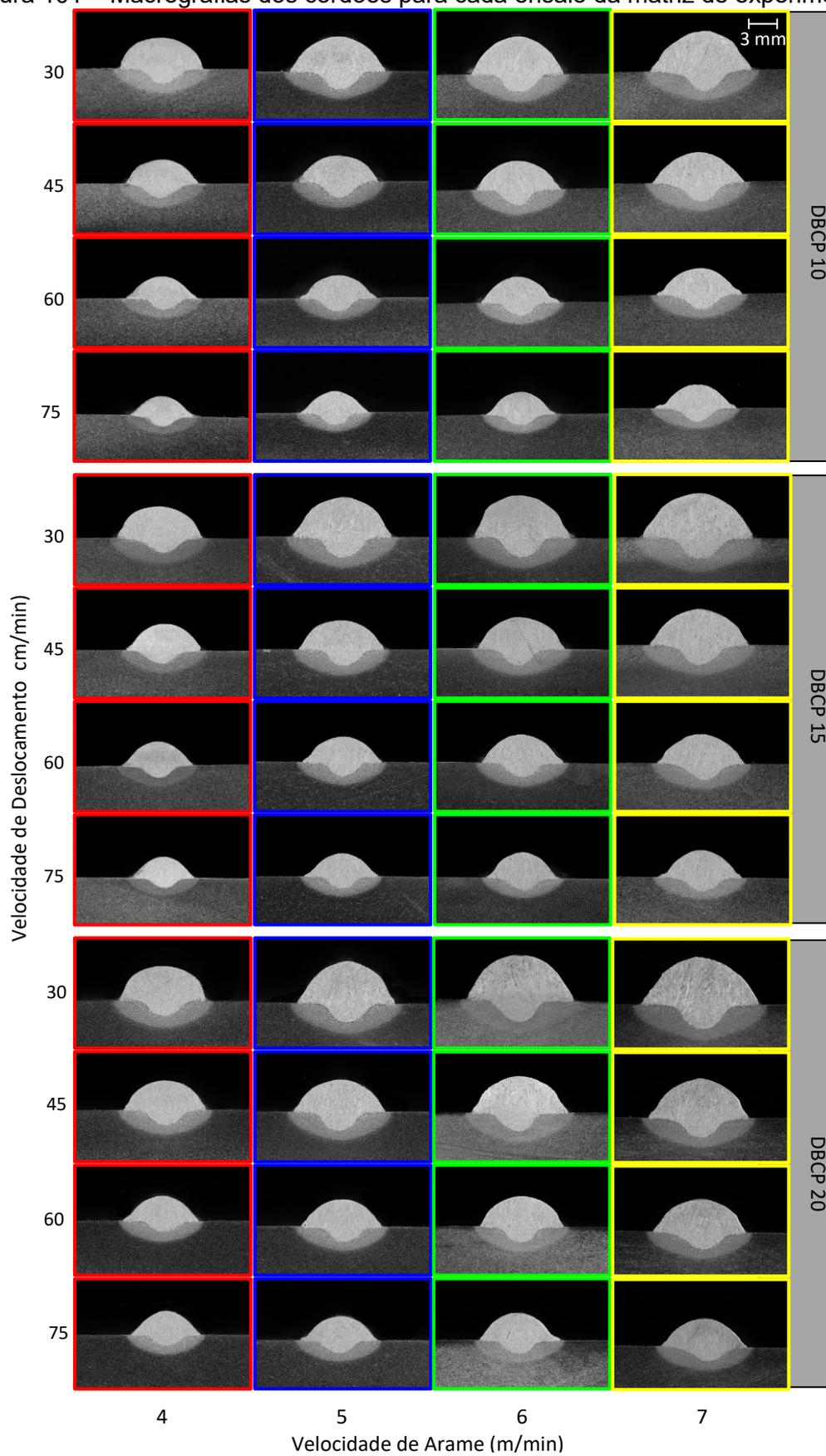


Fonte: Autor.

### **5.2.2 Influência da DBCP e VD nos aspectos geométricos do cordão para cada VA programada**

Todas estas características referentes a VA, corrente e tensão, observadas até aqui, resultaram em depósitos com características geométricas distintas para cada conjunto de parâmetros pré-programados na fonte de soldagem e no arranjo físico, DBCP e VD. A aparência geométrica da seção transversal dos depósitos da região central para as diferentes DBCPs podem ser observadas nas macrografias presentes na Figura 101.

Figura 101 – Macrografias dos cordões para cada ensaio da matriz de experimentos.



Fonte: Autor.

Com base na média de três macrografias e utilizando o algoritmo de análise de imagem descrito no Apêndice A, mediram-se e elaborou-se a Tabela 19, que apresenta as medidas e incertezas associadas às seguintes características geométricas: altura, largura, penetração, ângulo de molhamento e diluição. A partir deste conjunto de dados, foi possível realizar inferências baseadas em análises estatísticas. Como observação inicial, notou-se um grau de incerteza baixo, demonstrando repetibilidade e homogeneidade elevadas.

Tabela 19 – Medições das características geométricas referentes aos experimentos alterando a velocidade de arame, DBCP e velocidade soldagem.

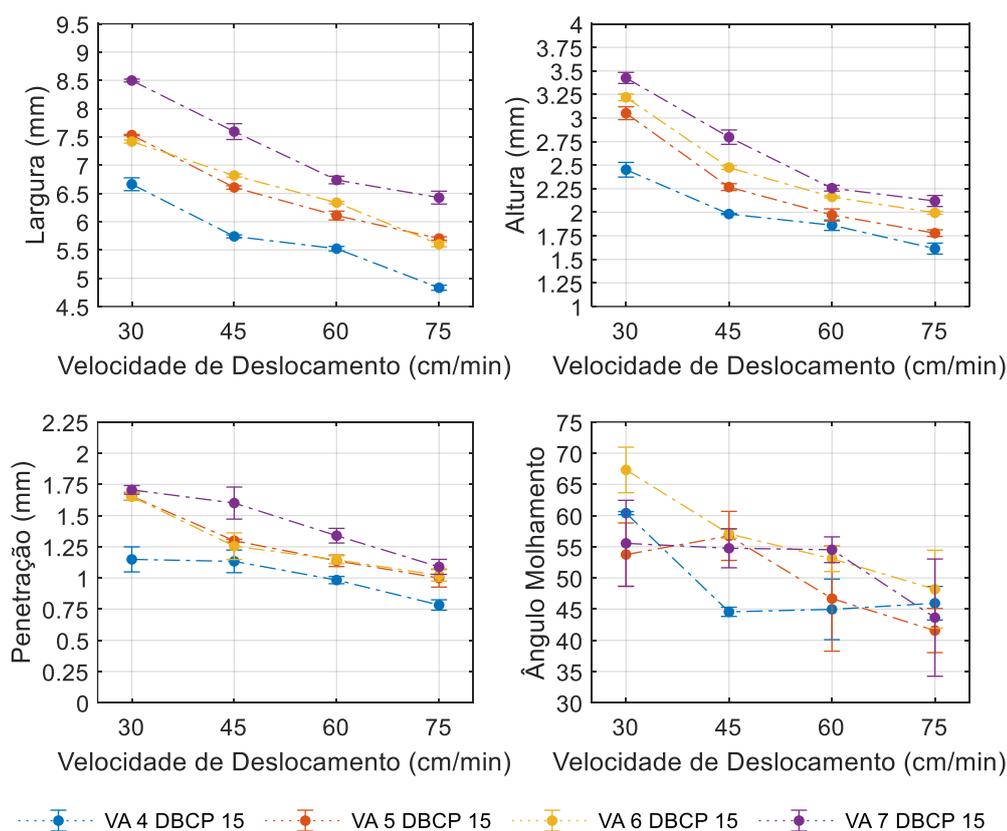
ID	VA Programada (m/min)	DBCP (mm)	VD (cm/min)	Largura (mm)	Inc. Largura (mm)	Altura (mm)	Inc. Altura (mm)	Penetração (mm)	Inc. Penetração (mm)	Ang. Molhamento	Inc. Ang Molhamento	Diluição (%)	Inc. Diluição (%)
E01	4	10	30	6.49	0.09	2.42	0.03	1.21	0.01	66.5	2.7	19.1	0.8
E02			45	5.55	0.10	1.83	0.04	1.17	0.06	57.2	4.0	28.8	1.8
E03			60	5.49	0.27	1.72	0.03	0.95	0.02	42.1	3.2	24.3	1.9
E04			75	4.93	0.05	1.55	0.08	0.81	0.01	43.0	5.0	24.2	0.8
E05		15	30	6.66	0.11	2.45	0.08	1.15	0.10	60.4	0.2	19.8	2.2
E06			45	5.74	0.03	1.98	0.01	1.13	0.09	44.6	0.7	26.8	0.9
E07			60	5.52	0.04	1.86	0.06	0.98	0.03	45.0	4.9	24.0	1.0
E08			75	4.83	0.05	1.61	0.06	0.78	0.04	45.9	2.7	23.4	0.4
E09		20	30	6.68	0.09	2.67	0.09	1.20	0.07	64.7	4.8	17.6	1.3
E10			45	6.32	0.13	2.27	0.08	1.22	0.07	57.6	0.4	22.3	2.3
E11			60	5.82	0.10	1.95	0.09	0.85	0.02	40.7	4.1	21.1	1.0
E12			75	5.41	0.10	1.87	0.02	0.85	0.08	45.4	1.2	21.8	2.2
E13	5	10	30	7.37	0.00	2.71	0.04	1.43	0.08	55.9	0.6	21.0	1.6
E14			45	6.17	0.03	2.02	0.04	1.26	0.02	52.2	1.6	25.4	1.0
E15			60	5.88	0.06	1.78	0.06	1.13	0.04	44.4	7.8	26.6	0.7
E16			75	5.18	0.06	1.65	0.06	1.00	0.03	43.2	4.1	28.5	1.8
E17		15	30	7.53	0.01	3.05	0.07	1.65	0.03	53.7	5.1	22.5	1.7
E18			45	6.61	0.03	2.27	0.04	1.30	0.01	56.7	3.9	22.5	0.3
E19			60	6.11	0.08	1.97	0.06	1.14	0.05	46.7	8.4	23.9	1.4
E20			75	5.70	0.03	1.78	0.04	1.00	0.07	41.6	3.5	24.9	2.1
E21		20	30	7.52	0.01	3.28	0.04	1.46	0.13	56.0	7.3	18.8	0.6
E22			45	7.07	0.02	2.48	0.09	1.51	0.06	55.1	3.2	24.3	1.0
E23			60	6.20	0.05	2.12	0.06	1.21	0.02	50.9	3.8	25.0	0.5
E24			75	5.84	0.03	1.86	0.04	1.04	0.03	42.6	2.0	25.9	1.2

E25	6	10	30	7.08	0.04	2.93	0.04	1.39	0.19	59.1	3.8	20.0	1.0
E26			45	6.46	0.06	2.22	0.02	1.28	0.06	53.8	4.5	22.1	0.1
E27			60	5.99	0.01	2.00	0.03	1.05	0.06	51.0	7.9	23.0	0.5
E28			75	5.35	0.04	1.74	0.04	0.86	0.06	45.2	4.7	24.5	2.3
E29		15	30	7.42	0.03	3.22	0.04	1.65	0.03	67.3	3.6	21.1	0.8
E30			45	6.82	0.03	2.47	0.02	1.25	0.11	57.1	0.7	19.3	1.7
E31			60	6.34	0.02	2.16	0.01	1.15	0.03	53.1	2.1	23.9	0.6
E32			75	5.60	0.04	1.99	0.02	1.02	0.05	48.2	6.3	23.1	1.4
E33		20	30	8.21	0.13	3.47	0.05	1.76	0.03	61.4	0.9	20.0	0.2
E34			45	7.44	0.08	2.81	0.03	1.51	0.02	58.0	1.2	21.5	0.7
E35			60	6.46	0.02	2.35	0.05	1.27	0.04	58.6	4.0	22.3	0.3
E36			75	6.21	0.02	2.12	0.03	1.10	0.03	52.8	2.6	23.7	1.7
E37	7	10	30	7.83	0.02	3.04	0.06	1.59	0.13	51.7	5.9	21.7	1.5
E38			45	7.08	0.05	2.35	0.04	1.52	0.09	52.7	7.2	27.1	2.1
E39			60	6.58	0.05	2.07	0.05	1.20	0.05	44.5	6.6	24.5	1.5
E40			75	6.27	0.04	1.84	0.04	1.08	0.04	37.0	1.5	25.8	0.9
E41	7	15	30	8.50	0.03	3.43	0.06	1.71	0.03	55.5	6.9	20.6	1.1
E42			45	7.59	0.14	2.80	0.08	1.60	0.13	54.8	3.1	23.0	0.5
E43			60	6.74	0.07	2.26	0.03	1.34	0.06	54.5	2.1	25.4	2.9
E44			75	6.43	0.11	2.12	0.06	1.09	0.06	43.6	9.4	23.1	1.7
E45	7	20	30	9.15	0.15	3.72	0.09	1.92	0.20	55.8	5.4	20.6	2.3
E46			45	7.72	0.10	3.07	0.05	1.55	0.29	51.7	3.9	21.7	3.0
E47			60	7.13	0.09	2.55	0.06	1.40	0.11	53.1	6.1	24.7	1.4
E48			75	6.52	0.16	2.16	0.14	1.22	0.06	50.7	6.2	26.9	1.8

Fonte: Autor.

A análise deste conjunto amostral revela que as características geométricas, conforme já esperado, diminuem em função da velocidade de deslocamento, fenômeno que ocorre independentemente da velocidade do arame. Isso pode ser observado na Figura 102, que ilustra o comportamento dos dados para a DBCP de 15 mm e para cada velocidade de arame programada.

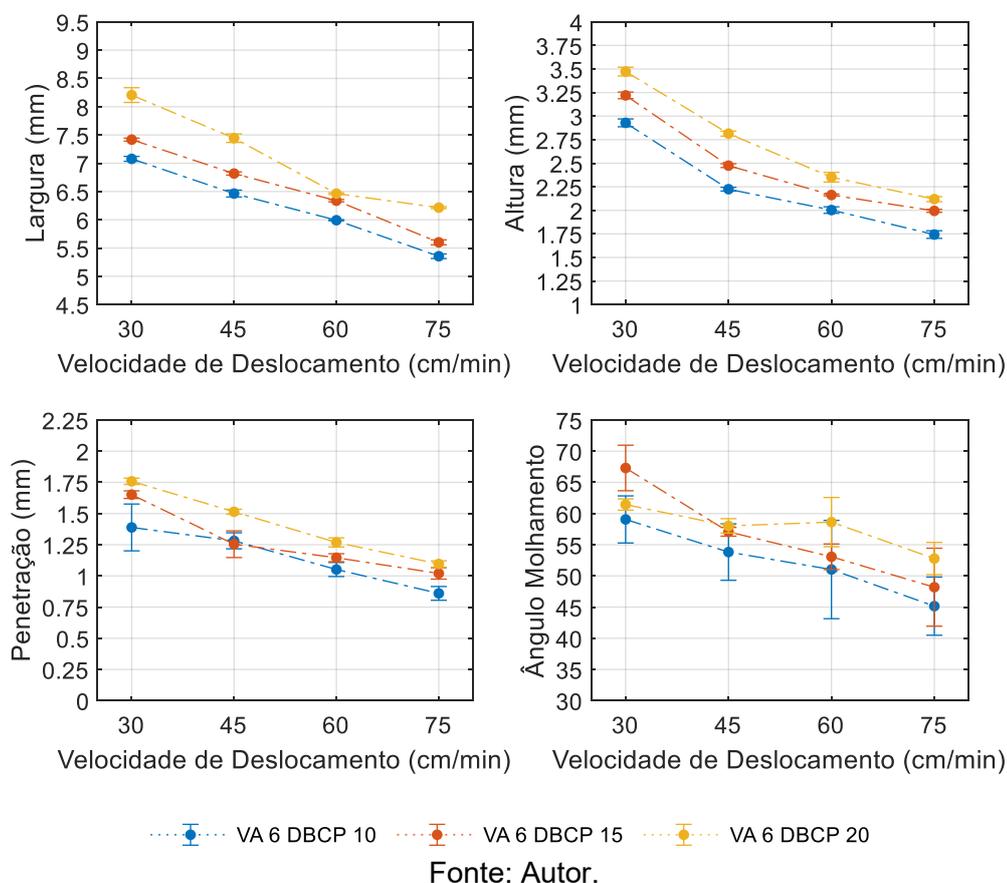
Figura 102 – Características geométricas em função da VD variando a VA dentro o conjunto referente a DBCP de 15 mm.



Fonte: Autor.

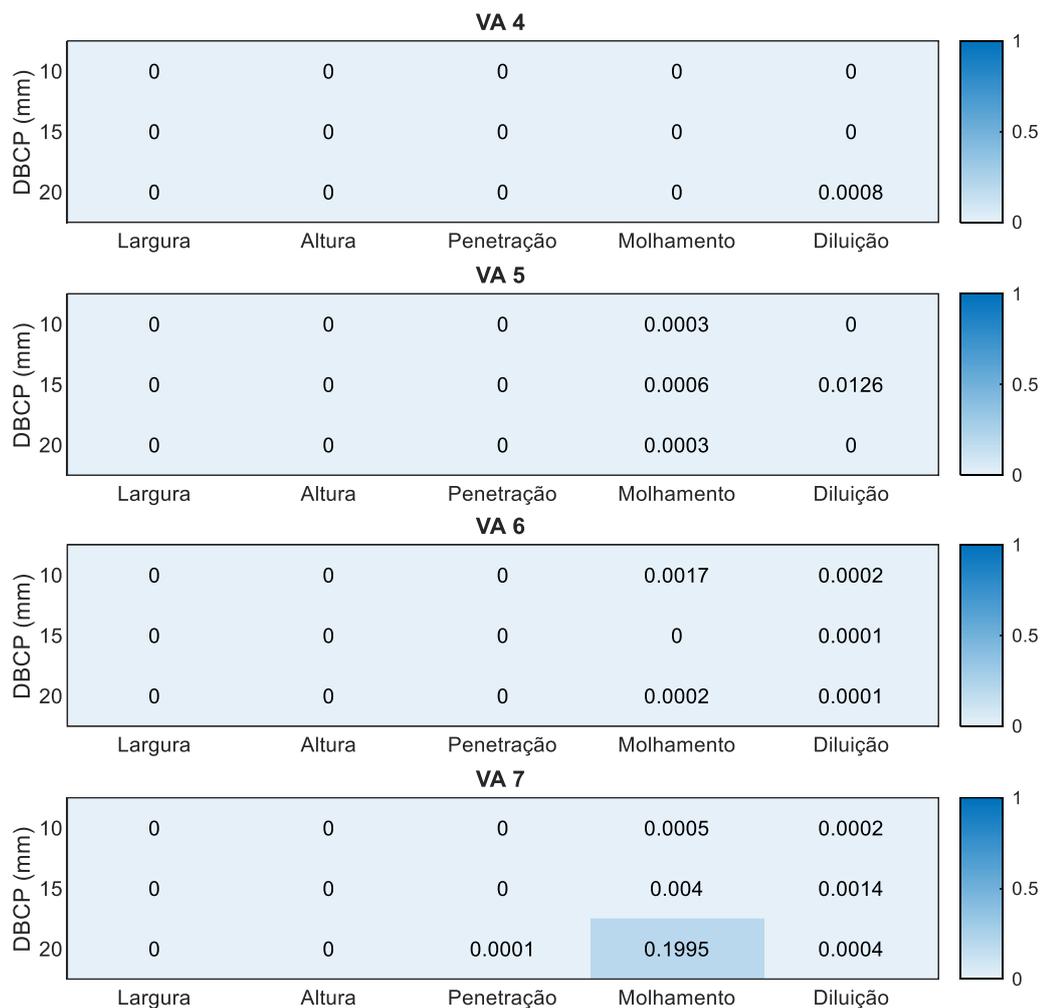
Este comportamento se repete à medida que se altera a DBCP. De maneira análoga ao conjunto anterior, observa-se o decréscimo das características geométricas em função da velocidade de deslocamento, independentemente da DBCP. A Figura 103, por exemplo, ilustra o comportamento dos dados relativos à velocidade de arame programada de 6 m/min em função da velocidade de deslocamento para cada DBCP.

Figura 103 – Características geométricas em função da VD variando a DBCP dentro do conjunto referente a VA programada de 6 m/min.



Para analisar a variação e dispersão dos dados, estes foram inicialmente agrupados com base na velocidade de arame programada e na DBCP. A fim de verificar se essa variação é significativa em relação à velocidade de deslocamento para cada conjunto de DBCP e velocidade de arame programada, aplicou-se um teste de hipótese utilizando a análise de variância (ANOVA), conforme descrito na metodologia. O resultado do teste indicou uma rejeição quase absoluta da hipótese nula ( $H_0$ ), com valores de  $p$  inferiores a 0.05, sugerindo uma diferença significativa em pelo menos uma das médias. Este resultado indica que a variação da VD afeta significativamente as características geométricas do cordão. O mapa de calor na Figura 104 ilustra os valores obtidos para a ANOVA de cada velocidade de arame programada.

Figura 104 – Valores-p referente ao teste de hipótese aplicado sobre os conjuntos de DBCP, variando a VD, para cada VA programada.

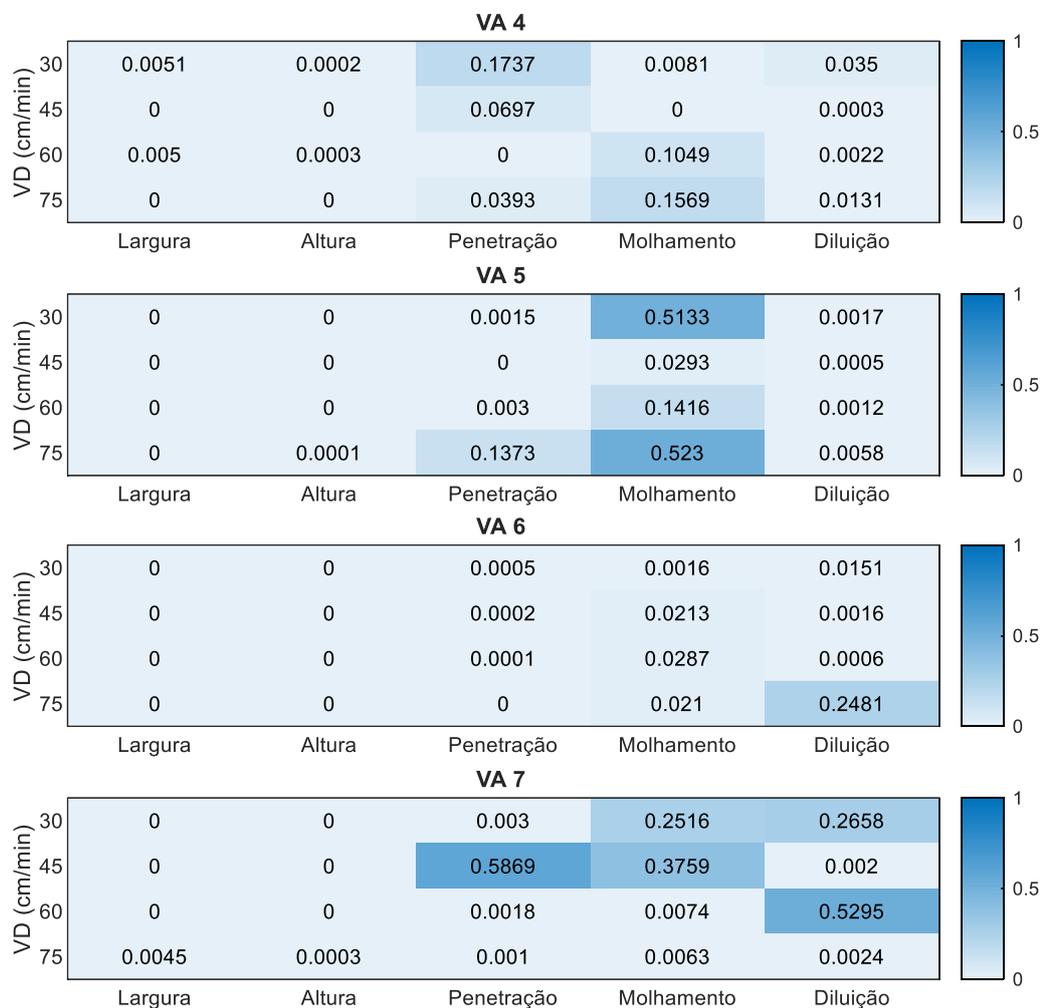


Fonte: Autor.

Realizou-se outro teste de hipótese para avaliar a influência da DBCP. Os dados foram agrupados com base na velocidade de arame programada e na velocidade de deslocamento, permitindo observar uma menor variação nas características geométricas dos experimentos. Ao aplicar a ANOVA, constatou-se uma rejeição quase absoluta da hipótese nula, com valores-p inferiores a 0.05, indicando diferenças significativas em pelo menos uma das médias. Esses resultados sugerem também uma influência significativa da DBCP nas características geométricas do cordão de solda, reforçando e corroborando com os resultados observados na seção anterior, que se concentram na análise da influência da variação da DBCP. Estes mostram, portanto, a importância do controle e da manutenibilidade da DBCP para a homogeneidade geométrica dos cordões depositados. O mapa de

calor na Figura 105 ilustra os valores obtidos para a ANOVA de cada velocidade de arame programada.

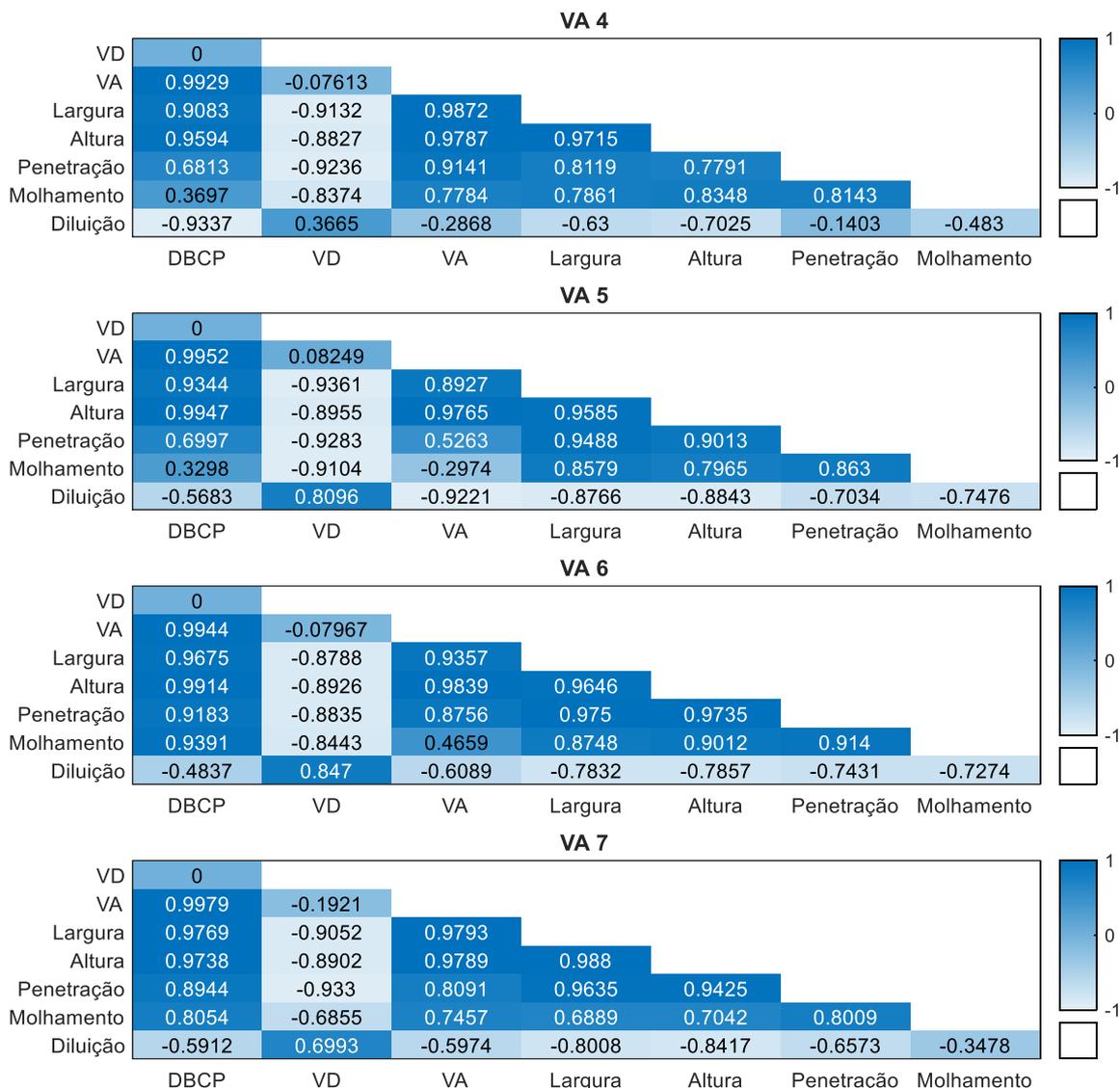
Figura 105 – Valores- $p$  referente ao teste de hipótese aplicado sobre os conjuntos de VD, variando a DBCP, para cada VA programada.



Fonte: Autor.

Além dos resultados obtidos por meio da análise de variância, é relevante explorar a possível existência de correlações entre as variáveis em estudo. A análise de correlação permite investigar a relação entre a DBCP, a velocidade de arame programada, a velocidade de deslocamento e as características geométricas dos cordões depositados. Compreender as interações entre esses fatores possibilita a obtenção de insights adicionais sobre os efeitos combinados das variáveis no processo de soldagem. Nesse contexto, conduziu-se uma análise de correlação para examinar a existência de relações lineares ou não lineares entre as variáveis, conforme proposto na metodologia. Os coeficientes de correlação, obtidos com o método proposto, estão representados na Figura 106 em forma de mapa de calor.

Figura 106 – Coeficientes de correlação para cada VA programada.



Fonte: Autor.

Os resultados desta análise, apresentados na Figura 106, revelam padrões interessantes nas interações entre as variáveis. Observa-se, que a DBCP tem uma forte correlação positiva com a VA, bem como com todas as características geométricas do cordão de solda, com exceção da diluição. Este padrão de correlação reforça os dados obtidos anteriores, evidenciando que o aumento na DBCP ao influenciar no aumento da VA impacta no aumento dos valores das características geométricas. Contudo, é importante destacar o comportamento peculiar do ângulo de molhamento, que não exibe uma correlação forte com a DBCP nas velocidades de arame programadas de 4 e 5 m/min.

Adicionalmente, observa-se um aumento na correlação a partir da velocidade de arame de 6 m/min. Embora a DBCP influencie significativamente a velocidade de arame, o aumento da VA induzido pela DBCP não implica necessariamente uma influência sobre essa característica específica para as velocidades programadas mais baixas. Isso sugere que o ângulo de molhamento é afetado por uma combinação de fatores e não apenas pela variação da DBCP.

Ao analisar a VD, observou-se que ela possui uma forte correlação negativa com todas as características geométricas do cordão de solda, com exceção da diluição, em todas as VA. Isso sugere que as características geométricas tendem a diminuir à medida que a VD aumenta, enquanto a diluição tende a aumentar com o incremento da VD.

Ao analisar a correlação da variação da VA dentro do bloco da respectiva VA programada, constatou-se sua associação com as características geométricas do cordão de solda. Isso indicou que as variações na VA estão também ligadas às alterações nessas características, ou seja, tendem a aumentar com a aumento da VA, a qual é influenciada pela DBCP. Por outro lado, a diluição mostrou uma tendência inversa, diminuindo com a variação da VA. Em contraste, a correlação com o ângulo de molhamento foi menos pronunciada, com alguns valores indicando uma correlação positiva moderada e, no caso da VA de 5 m/min, uma correlação negativa fraca. Isso pode sugerir que a variação na VA não resulta necessariamente em um aumento uniforme dessa característica específica, corroborando a hipótese de que o ângulo de molhamento é afetado por uma combinação de fatores e não apenas pela variação da DBCP.

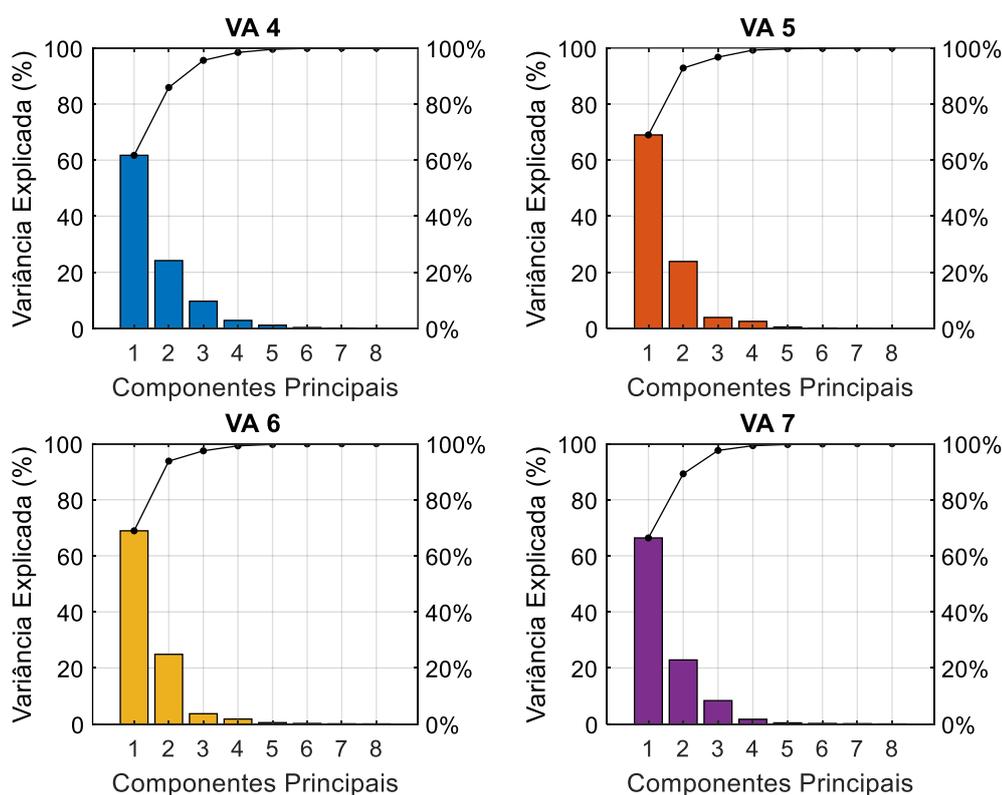
Além disso, observou-se que as características geométricas do cordão de solda estão inter-relacionadas. Por exemplo, a largura apresenta uma relação positiva com a altura, penetração e molhamento, indicando que variações em uma dessas dimensões geralmente correspondem a mudanças nas outras. Em contrapartida, a diluição exibe um comportamento inverso, sugerindo que aumentos em características como largura e altura podem resultar em uma menor proporção de diluição. Esse fenômeno pode ser justificado pela maior quantidade de material na poça de fusão, “isolando” a peça do arco.

Para complementar as análises previamente realizadas, empregou-se a análise multivariada de componentes principais (PCA), conforme descrito na

metodologia, visando identificar qual variável exerce a maior influência na variação das características geométricas.

A aplicação da PCA permitiu simplificar a complexidade do conjunto de dados ao reduzir sua dimensionalidade. Isso foi alcançado transformando o conjunto original de variáveis em um novo conjunto de componentes principais, que são variáveis não correlacionadas entre si. Esses componentes, constituídos por combinações lineares das variáveis originais, desempenham um papel crucial na explicação da variância dos dados. Nesse contexto, verificou-se que para cada conjunto de VA programada, o primeiro componente principal é responsável por aproximadamente 65% da variância total, enquanto o segundo componente contribui com cerca de 20%. Somados, esses dois componentes explicam mais de 85% da variância total dos dados, conforme mostram os gráficos de Pareto na Figura 107.

Figura 107 – Gráficos de Pareto da variância explicada pelos componentes principais na análise de PCA para as características geométricas para cada conjunto de VA programada variando VD e DBCP.



Fonte: Autor.

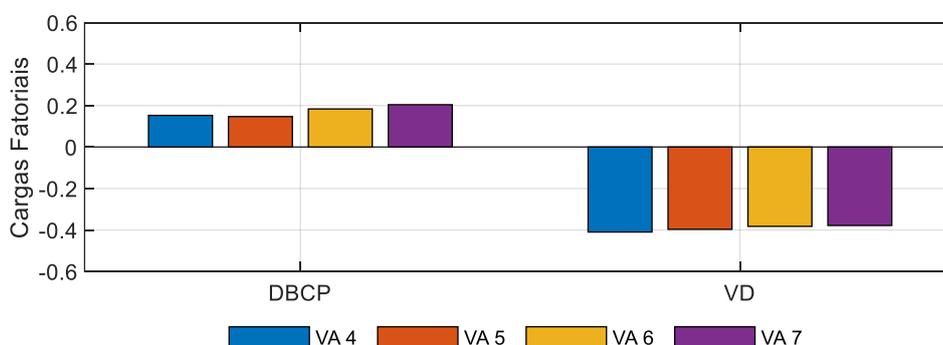
Na análise das cargas do primeiro componente principal, que é responsável pela maior parcela da variância explicada, notou-se que os valores relativos à DBCP são consistentemente positivos e tendem a crescer à medida que aumenta a

velocidade de arame programada. Tal observação indica uma correlação positiva entre a DBCP e a variância expressa pelos componentes principais, com essa relação se intensificando em velocidades mais elevadas de arame.

Em contrapartida, as cargas referentes à VD apresentam-se negativas em todas as velocidades programadas, sugerindo uma correlação inversa entre a VD e os componentes principais. Além disso, a magnitude dessas cargas decresce sutilmente com o aumento da velocidade de arame programada, o que pode sinalizar que o impacto da VD sobre os componentes principais se atenua em velocidades mais altas. A oposição nos sinais das cargas de DBCP e VD implica que essas variáveis podem exercer efeitos divergentes sobre as características dos dados capturadas pelos componentes principais, ou seja, nas características geométricas; isto é, enquanto um incremento na DBCP pode estar relacionado ao aumento de determinadas características geométricas, um aumento na VD pode estar vinculado à diminuição destas.

Essa inferência está alinhada com análises anteriores. A avaliação da magnitude das cargas dos componentes principais revela que a VD exerce maior influência na variância dos dados do que a DBCP, conforme demonstrado pelas cargas mais elevadas em todas as configurações de velocidade de arame examinadas. Portanto, no contexto dos componentes principais analisados, a VD é um determinante mais significativo da variação dos dados do que a DBCP. A representação gráfica destas relações pode ser visualizada na Figura 108.

Figura 108 – Comparação das cargas fatoriais de DBCP e VD no componente principal de maior variância explicada para cada VA programada.



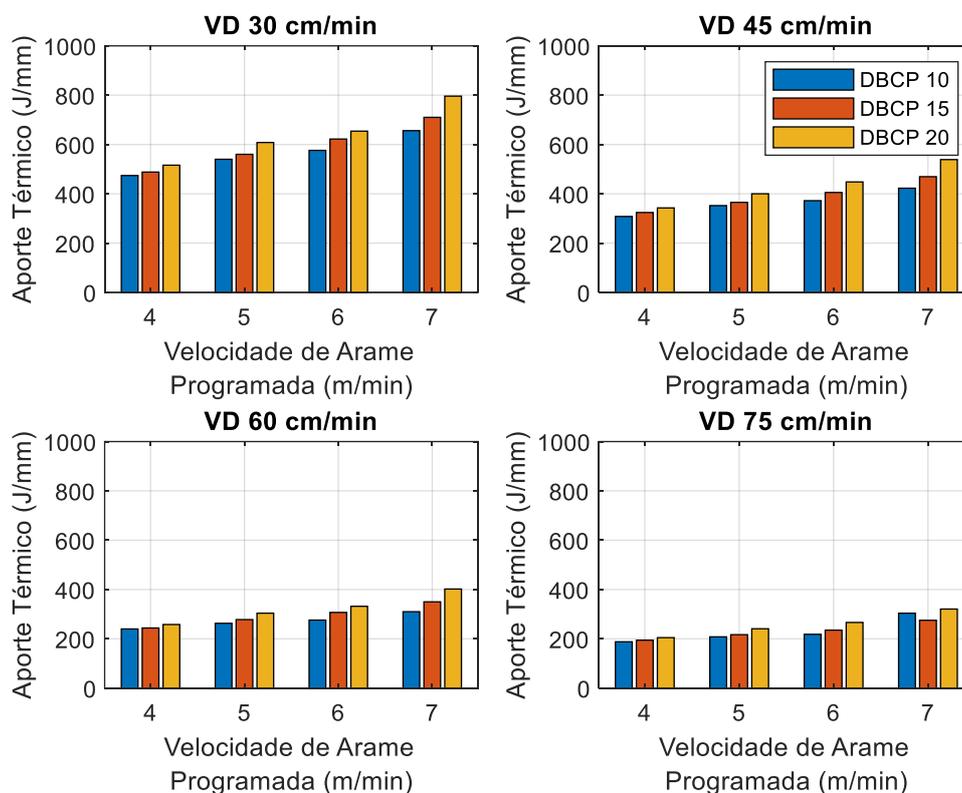
Fonte: Autor.

Em resumo, constatou-se que, apesar da influência da DBCP sobre as características geométricas, a VD demonstra uma contribuição mais expressiva. No

entanto, com base nas análises é importante destacar, especialmente no contexto da manufatura aditiva, a relevância de controlar a variação da DBCP ao longo do processo de deposição, para mitigar variações geométricas significantes ao longo das deposições. Observou-se também que a VD apesar de afetar significativamente a geometria do cordão de solda, não afeta os parâmetros de soldagem como a DBCP, por exemplo. Sendo assim, para a modificação das características geométricas do cordão, é preferível ajustar a VD, mantendo assim constantes, a potência e a velocidade média de arame, o que contribui para a redução do aporte térmico, conforme mostram os gráficos da Figura 109.

Portanto, baseando-se nos dados analisados e na faixa operacional mapeada, e considerando que as variações causadas pela DBCP, embora relevantes, apresentam maior complexidade de controle durante a geração da trajetória e os efeitos não se limitam apenas a geométrica do cordão e se estendem aos parâmetros elétricos, optou-se por fixar a DBCP em 15 mm, valor intermediário da faixa analisada. Dessa forma, o banco de dados para o desenvolvimento dos algoritmos de parametrização se baseará nos dados relativos à DBCP de 15 mm.

Figura 109 – Comparação do aporte térmico em função da velocidade de arame programada e DBCP para cada VD da base de dados.



Fonte: Autor.

Na fase subsequente deste estudo, será realizada uma análise detalhada do processo de soldagem com foco no perfil geométrico dos depósitos, considerando variadas condições térmicas do substrato. O objetivo é estabelecer um limiar de temperatura intercamada que minimiza sua influência sobre as características geométricas dos depósitos.

Na sequência, será realizado um estudo dedicado ao desenvolvimento e à otimização de técnicas para sobreposições horizontais e verticais. O objetivo é criar um modelo analítico que possa ser incorporado em algoritmos de parametrização, contemplando variáveis de entrada, como a largura da parede. Esta análise abordará as características dos depósitos de solda em diferentes configurações de sobreposição, visando elucidar a interação de sua geometria as variáveis do processo, por exemplo, a velocidade de arame programada e a velocidade de deslocamento.

O desenvolvimento de um modelo preditivo facilitará a antecipação e o controle das características geométricas dos depósitos, contribuindo significativamente para a eficácia e o aprimoramento do processo de soldagem.

### 5.3 ANÁLISES E DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE CONTROLE DE TEMPERATURA INTERCAMADA

Nesta seção, serão apresentados os resultados concernentes ao desenvolvimento de uma base refrigerada para a célula de manufatura aditiva utilizada ao longo desta tese e de um sistema de controle de temperatura intercamada baseado em um sensor infravermelho.

#### 5.3.1 Análise da influência da temperatura do substrato sobre a geometria do cordão de solda

A consistência nas características geométricas dos cordões depositados é fundamental para a manufatura aditiva. Como observado, variações do processo são complexas e dependentes entre si. Além dos parâmetros elétricos e de movimento, a temperatura do substrato ou interpasse também pode ser um fator de alteração significativo. Portanto, é essencial analisar a geometria do cordão de solda em relação à essa temperatura, para compreender como essa variável pode influenciar o processo de soldagem. Na manufatura aditiva, a temperatura tanto do substrato quanto das camadas interpostas ou temperatura interpasse pode desempenhar um papel crucial na formação dos cordões depositados subsequentes e influenciar diretamente suas características geométricas e propriedades metalúrgicas [27, 76].

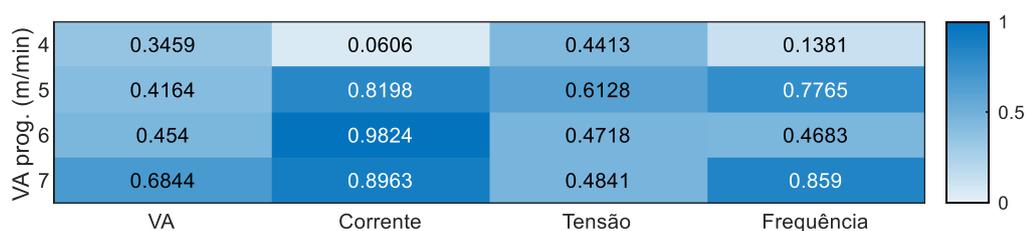
Nesta subseção, serão tratados dos experimentos realizados por meio da deposição de cordões simples sobre chapa, variando a temperatura do substrato entre 100, 200, 300 e 500 °C, conforme descrito na metodologia. Nos experimentos foi utilizada toda a faixa de VA programada (4 a 7 m/min), mantendo-se a DBCP de 15 mm e VD de 45 cm/min. As análises foram divididas em duas etapas: análise dos parâmetros de soldagem e análise das características geométricas dos cordões depositados. Os resultados referentes à medição dos parâmetros de soldagem estão detalhados na Tabela 19.

Tabela 20 – Medições dos parâmetros de soldagem referentes aos experimentos alterando a temperatura do substrato.

ID	VA Prog. (m/min)	Temp. (°C)	VA (m/min)	Inc. VA (m/min)	Im (A)	Inc. Im (A)	Um (V)	Inc. Um (V)	Potência (kW)	Aporte Térmico (J/mm)	Freq. (Hz)	Inc. Freq. (Hz)
E01	4.0	100	3.9	0.3	144	4	13.2	0.5	2.5	203	97	5
E02		200	4.1	0.1	149	2	13.4	0.3	2.6	213	101	3
E03		300	4.1	0.1	146	2	13.5	0.2	2.5	211	99	6
E04		500	3.9	0.1	140	3	13.2	0.2	2.4	196	91	4
E05	5.0	100	4.7	0.2	169	3	13.8	0.3	2.7	248	100	3
E06		200	4.9	0.2	170	4	14.0	0.5	2.8	254	101	3
E07		300	4.9	0.2	170	3	14.0	0.5	2.8	254	102	3
E08		500	4.7	0.1	168	3	13.7	0.2	2.7	245	99	3
E09	6.0	100	5.7	0.2	196	3	14.2	0.4	3.0	295	100	4
E10		200	6.0	0.3	196	3	14.6	0.4	3.1	305	102	5
E11		300	5.9	0.2	196	3	14.4	0.5	3.1	300	100	3
E12		500	5.8	0.2	197	2	14.1	0.3	3.0	296	97	3
E13	7.0	100	6.5	0.2	214	3	14.7	0.3	3.5	336	98	4
E14		200	6.6	0.3	214	4	15.0	0.5	3.5	342	100	5
E15		300	6.8	0.3	214	3	15.3	0.5	3.6	351	100	5
E16		500	6.6	0.2	212	3	15.0	0.5	3.5	339	97	5

Fonte: Autor.

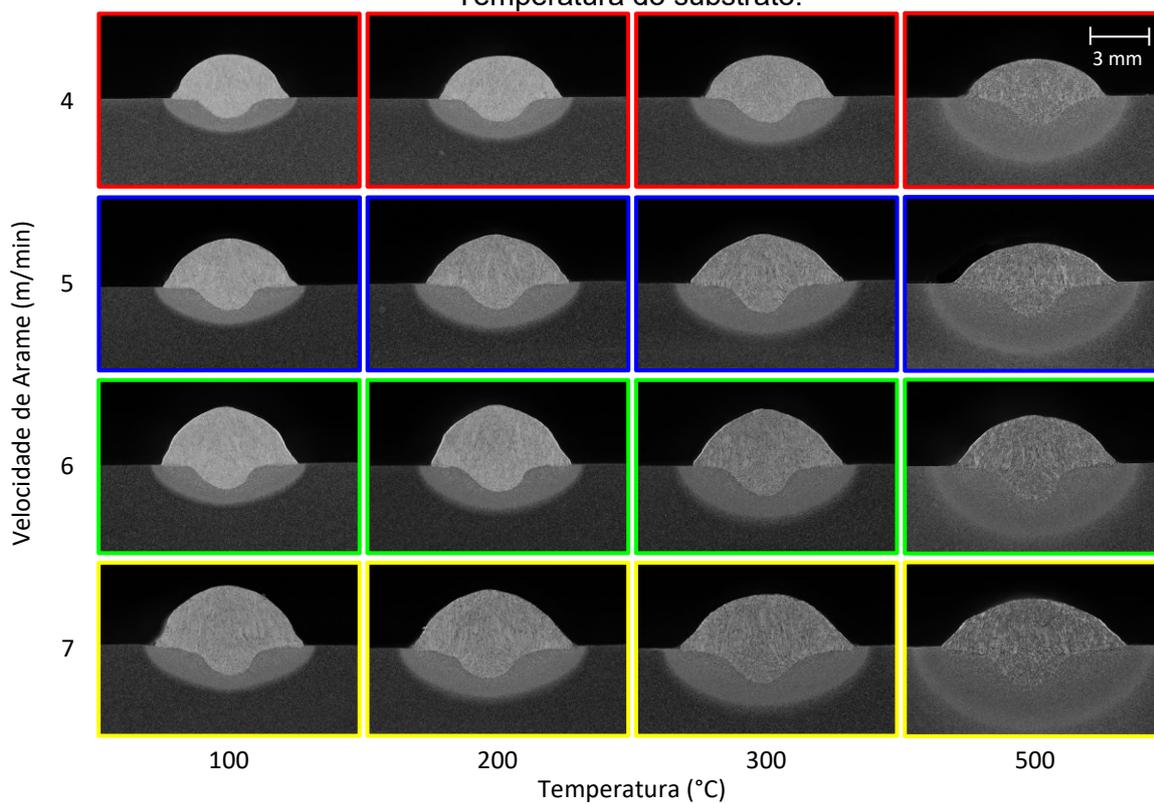
A análise estatística ANOVA, conforme apresentado na Figura 110, sugere que não há dispersão significativa dos dados, evidenciada pela não rejeição da hipótese nula ( $H_0$ ). Isso indica que a temperatura do substrato não tem um impacto estatisticamente significativo sobre os parâmetros de soldagem.

Figura 110 – Valores- $p$  referentes ao teste de hipótese aplicado sobre os parâmetros de soldagem obtidos para as diferentes temperaturas de substrato testadas.

Fonte: Autor.

Em contrapartida, a análise visual das macrografias, presentes na Figura 111, revela que as características geométricas dos cordões depositados sofrem alterações conforme a temperatura do substrato se eleva. Não apenas as características geométricas variam, mas também a zona afetada pelo calor (ZAC), evidenciando a influência da temperatura do substrato no processo de deposição.

Figura 111 – Macrografias da região dos cordões depositados variando a VA e a Temperatura do substrato.



Fonte: Autor.

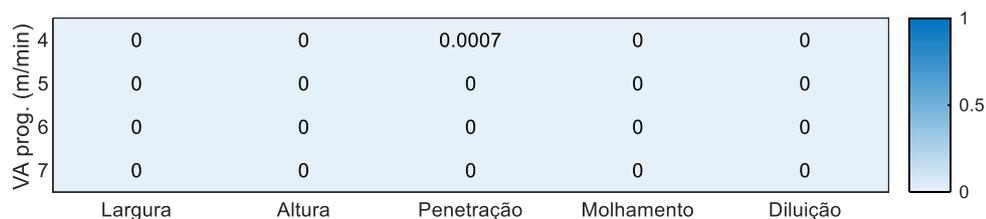
Conforme descrito na metodologia, a Tabela 21 foi elaborada a partir da média de três macrografias e contém os dados referentes às medições realizadas. Esta tabela complementa as observações visuais da Figura 111, fornecendo uma base quantitativa para a análise das variações geométricas dos cordões depositados em função da temperatura do substrato.

Tabela 21 – Medições das características geométricas referentes aos experimentos alterando a temperatura do substrato.

ID	VA Prog. (m/min)	Temp. (°C)	Largura (mm)	Inc. Largura (mm)	Altura (mm)	Inc. Altura (mm)	Penetração (mm)	Inc. Penetração (mm)	Ang. Molhamento	Inc. Ang. Molhamento	Diluição (%)	Inc. Diluição (%)
E01	4.0	100	5.87	0.13	2.29	0.01	1.12	0.05	59.1	1.0	20.9	5.87
E02		200	6.14	0.12	2.32	0.03	1.20	0.05	59.5	2.0	25.5	6.14
E03		300	6.36	0.06	2.26	0.03	1.32	0.05	56.6	3.0	25.5	6.36
E04		500	7.14	0.03	2.08	0.05	1.39	0.05	50.1	1.0	29.0	7.14
E05	5.0	100	6.92	0.15	2.68	0.04	1.20	0.07	58.9	2.5	20.5	6.92
E06		200	7.28	0.15	2.65	0.05	1.36	0.08	54.7	2.5	22.7	7.28
E07		300	7.85	0.05	2.54	0.01	1.50	0.05	46.9	1.0	25.1	7.85
E08		500	8.09	0.11	2.18	0.04	1.59	0.05	41.9	1.0	29.9	8.09
E09	6.0	100	6.90	0.20	3.11	0.04	1.24	0.05	63.3	3.0	18.3	6.90
E10		200	7.32	0.20	3.07	0.07	1.33	0.05	56.1	3.0	21.1	7.32
E11		300	7.57	0.12	2.93	0.06	1.54	0.05	50.5	2.0	22.5	7.57
E12		500	8.32	0.06	2.63	0.08	1.92	0.10	50.2	1.0	27.3	8.32
E13	7.0	100	7.48	0.20	3.08	0.02	1.52	0.05	55.2	3.5	20.4	7.48
E14		200	8.18	0.20	3.06	0.04	1.50	0.10	47.8	3.0	21.2	8.18
E15		300	8.78	0.11	2.80	0.09	1.70	0.05	48.8	2.0	27.4	8.78
E16		500	8.96	0.04	2.53	0.05	2.00	0.05	44.1	1.0	28.7	8.96

Fonte: Autor.

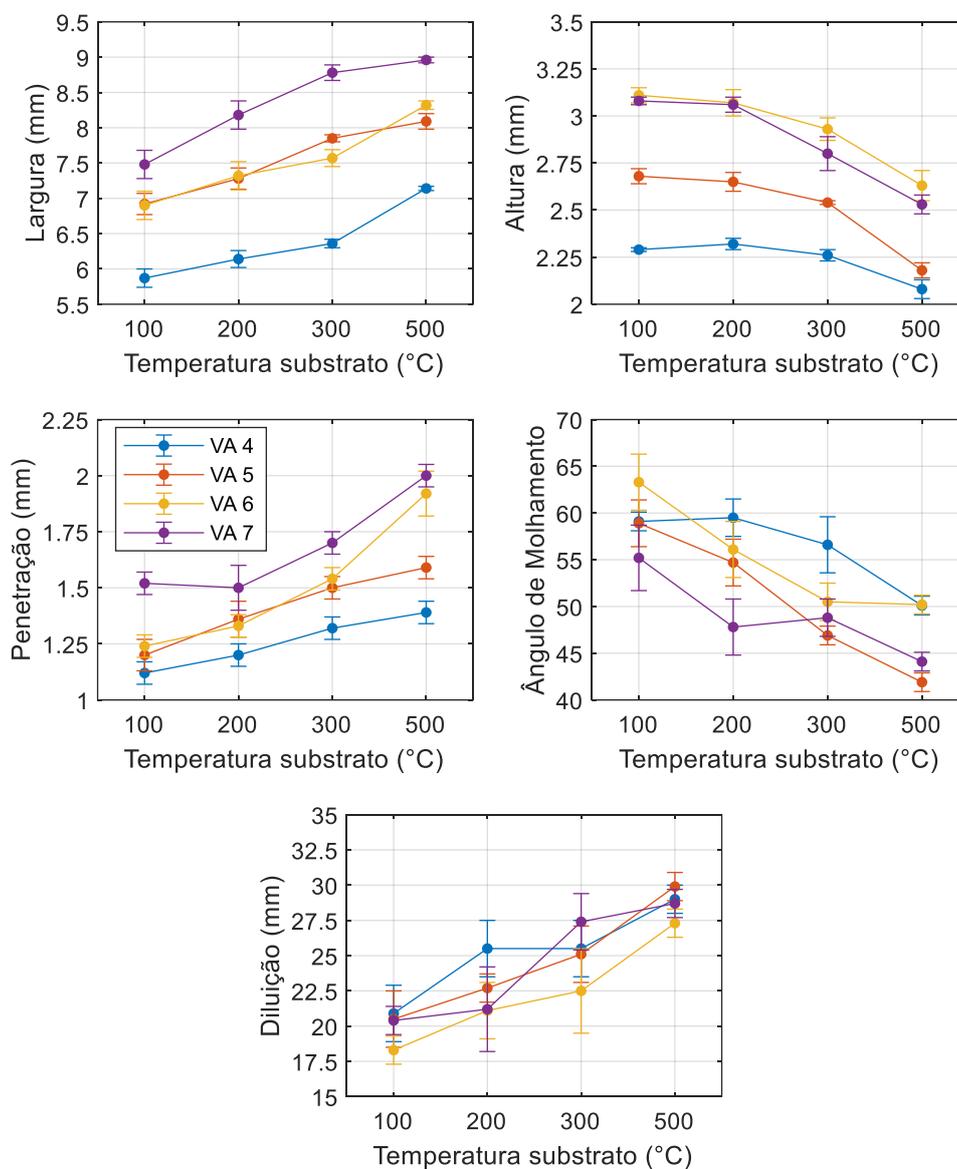
Em continuidade à análise das variações geométricas observadas nas macrografias e quantificadas na Tabela 21, procedeu-se com um teste de hipótese para avaliar a significância estatística da influência da temperatura do substrato. Os resultados do teste apontaram para uma rejeição absoluta da hipótese nula ( $H_0$ ), com valores- $p$  inferiores a 0.05, conforme ilustrado no mapa de calor da Figura 112. Esses resultados permitem afirmar que existe, pelo menos, uma diferença significativa entre as médias dos grupos analisados. Dessa forma, confirma-se que a temperatura do substrato tem um impacto estatisticamente significativo nas características geométricas dos cordões depositados.

Figura 112 – Valores- $p$  referentes ao teste de hipótese aplicado sobre as características geométricas obtidas para as diferentes temperaturas de substrato testadas.

Fonte: Autor.

Analisando o comportamento dos dados verificou-se uma tendência de aumento na largura dos cordões depositados com a elevação da temperatura do substrato. De maneira similar, observa-se que a penetração também tende a aumentar com o incremento da temperatura, assim como, a diluição. Contudo, por outro lado, o ângulo de molhamento exibe uma tendência oposta à da largura, penetração e diluição, diminuindo à medida que a temperatura do substrato cresce, indicando um aumento da molhabilidade do cordão sob temperaturas mais elevadas. Além disso, a altura apresenta uma ligeira diminuição em função do aumento da temperatura, com uma redução mais pronunciada para velocidades de arame superiores a 5 m/min e temperaturas acima de 200 °C. Este comportamento, ilustrando as mudanças nas características geométricas dos cordões depositados em resposta à variação da temperatura do substrato, é demonstrado nos gráficos da Figura 113.

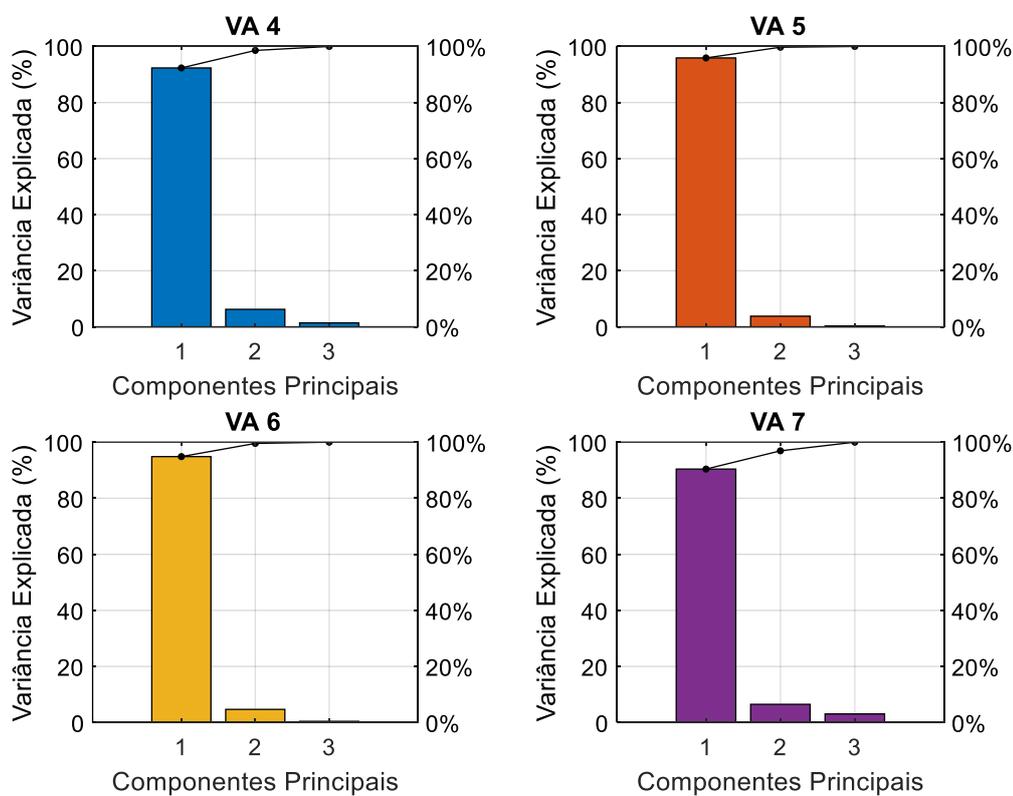
Figura 113 – Gráfico das características geométricas em função da temperatura do substrato.



Fonte: Autor.

Com o objetivo de complementar esta análise e compreender o impacto da temperatura nas variáveis mencionadas, utilizou-se à técnica de análise multivariada de PCA. A Figura 114 ilustra a variância explicada por cada componente principal para as diferentes velocidades de arame programadas. Observa-se que o primeiro componente principal é responsável por captar mais de 90% da variância do conjunto de dados.

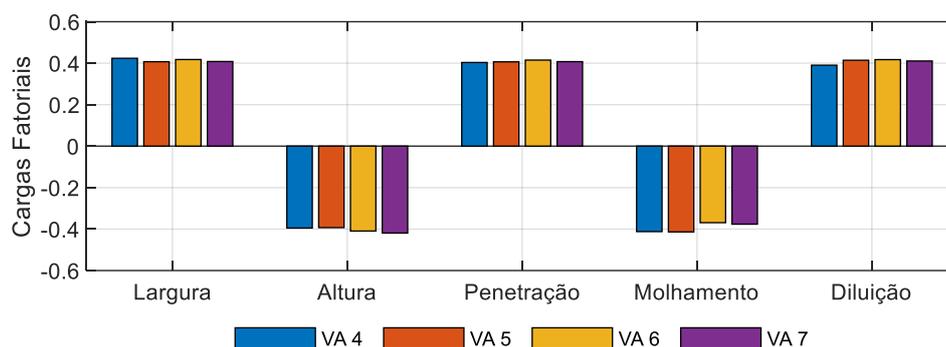
Figura 114 – Gráficos de Pareto da variância explicada pelos componentes principais na análise de PCA para as características geométricas obtidas para cada conjunto de VA programada variando a temperatura do substrato.



Fonte: Autor.

Ao analisar as cargas fatoriais de cada variável no primeiro componente principal, apresentadas na Figura 115, nota-se que todas são influenciadas pela temperatura, mostrando uma magnitude, em média, similar. No entanto, destaca-se que altura e molhamento têm um comportamento inverso em relação às demais variáveis, ou seja, à medida que a temperatura aumenta estas variáveis tendem a diminuir, conforme já observado na análise dos gráficos da Figura 113. Portanto, constatou-se que o aumento da temperatura do substrato resulta em cordões depositados mais largos, baixos e com maior molhabilidade. Esse comportamento é possivelmente resultado do sobreaquecimento, que reduz a tensão superficial, levando à formação de cordões depositados com estas características [118].

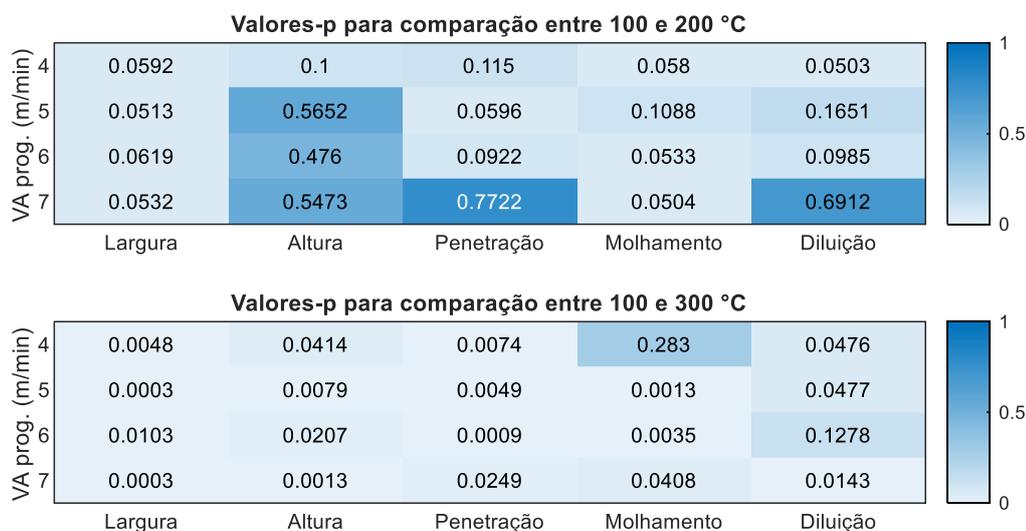
Figura 115 – Comparação das cargas fatoriais das características geométricas no componente principal de maior variância explicada para cada VA programada.



Fonte: Autor.

Com base nas análises realizadas, infere-se que o controle preciso da temperatura intercamada é essencial para manter a geometria dos cordões depositados consistente. Para evitar variações significativas nas características geométricas, é imprescindível que as temperaturas intercamadas ou interpasse sejam mantidas abaixo de 200 °C para esse material. Esta asserção é apoiada pelos resultados dos testes de hipótese, que evidenciam a não-rejeição da hipótese nula (valores- $p > 0,05$ ) para a comparação dos dados referentes as temperaturas do substrato entre 100 e 200 °C e a rejeição de  $H_0$  (valores- $p < 0,05$ ) para os dados das temperaturas de 100 e 300 °C. Estes resultados são evidenciados no mapa de calor na Figura 116.

Figura 116 – Valores- $p$  do teste ANOVA para características geométricas dos cordões em comparando as temperaturas de 200 e 300 °C com a temperatura de 100 °C.



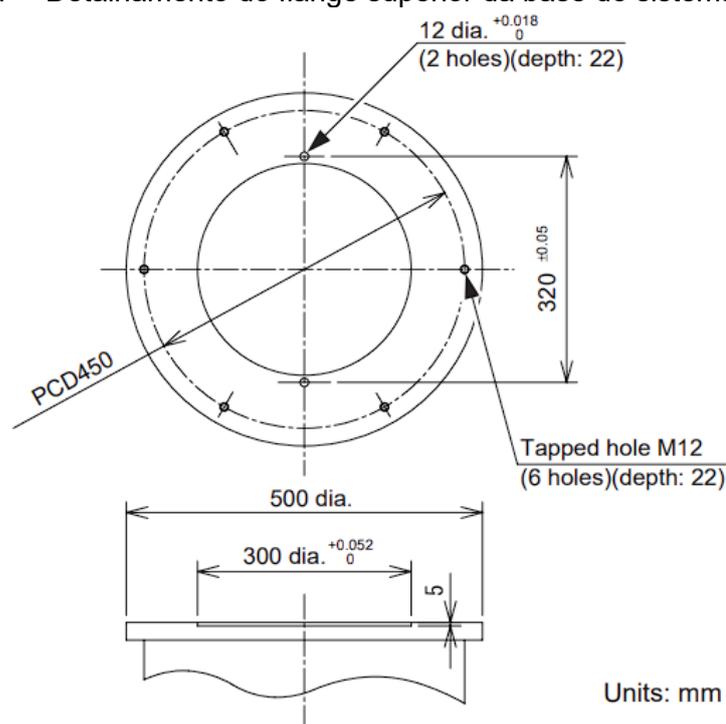
Fonte: Autor.

Nesse sentido, ao longo deste trabalho, também serão discutidos resultados oriundos do desenvolvimento de um sistema de controle de temperatura baseado em um sensor infravermelho. Essa abordagem se apresenta como uma solução promissora para enfrentar o desafio de controle térmico na soldagem. A integração desse sistema proporciona um controle preciso, em tempo real, do processo de deposição 3D, contribuindo para a obtenção de peças de alta qualidade e confiabilidade geométrica.

### 5.3.2 Projeto e desenvolvimento de base refrigerada

Inicialmente, utilizando o datasheet da mesa posicionadora (Motopos MPD250B) verificou-se suas dimensões e o padrão de furação para fixação de acessórios sobre a sua superfície, o detalhamento do flange superior da mesa posicionadora pode ser visto na Figura 117.

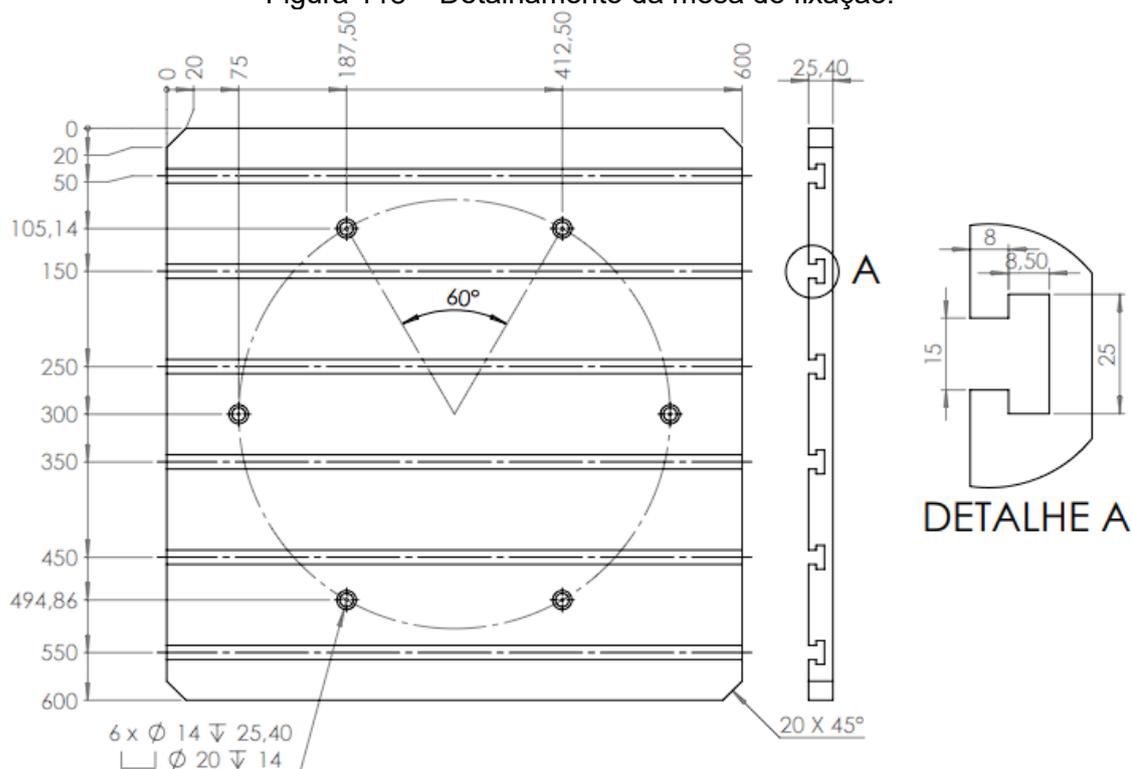
Figura 117 – Detalhamento do flange superior da base do sistema Motopos.



Fonte: Motoman [1].

O maior diâmetro da mesa do posicionador é de 500 mm e o diâmetro da região de furação é 450 mm com defasagem angular equidistante para todos os 6 furos que são padrão M12 com 22 mm de profundidade. Com base, nestas informações foi possível definir o padrão de fixação. A mesa de fixação foi projetada por meio da ferramenta de CAD SolidWork, com 600 x 600 x 25 mm e rasgos do tipo de T14 distribuídos ao longo da mesa com distância de 100 mm. A Figura 118 ilustra o desenho detalhado da mesa de fixação.

Figura 118 – Detalhamento da mesa de fixação.



Fonte: Autor.

A mesa foi fabricada por meio de usinagem utilizando como matéria prima aço carbono SAE 1045, além disto, posterior tratamento de galvanização na superfície também foi realizado. A foto apresentada na Figura 119, mostra o resultado o final da mesa de fixação após sua fabricação.

Figura 119 – Resultado da fabricação da mesa de fixação para o Motopos.



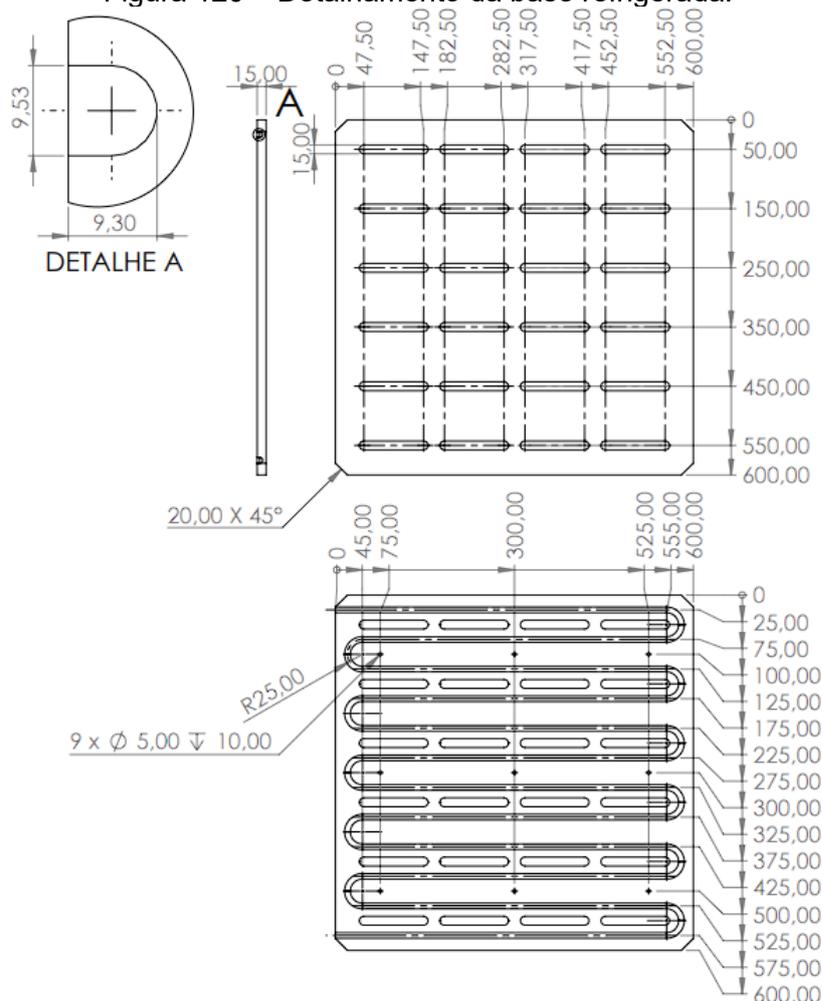
Fonte: Autor.

Durante o projeto e fabricação da mesa de fixação, foi desenvolvido um sistema de troca de calor ativo para atender a duas necessidades específicas.

Primeiramente, buscava-se aumentar a taxa de resfriamento das peças soldadas, garantindo sua estabilidade térmica. Além disso, visava-se resfriar o posicionador Motopos, que, devido a longos ciclos de trabalho expostos ao arco elétrico, tende a apresentar sobreaquecimento.

Para atender a essas demandas, foi projetado um sistema baseado em dois materiais com elevado coeficiente de condução térmica: alumínio e cobre. O alumínio foi utilizado na fabricação de uma base de 600 x 600 x 15 mm com sulcos usinados, para acomodar uma tubulação de 9,52 mm de diâmetro de cobre, empregada em forma de serpentina, cuja montagem foi feita por interferência na base e selado por uma tampa, também de alumínio. A quantidade de sulcos foi dimensionada, com um espaçamento de 50 mm entre eles. O detalhamento do projeto da base pode ser observado na Figura 120.

Figura 120 – Detalhamento da base refrigerada.



Fonte: Autor.



Dessa forma, concluiu-se que o sistema de troca de calor ativo, integrado à mesa de fixação, proporciona um resfriamento eficiente das peças e do posicionador Motopos, garantindo a estabilidade térmica necessária para um desempenho adequado durante a soldagem, como demonstraram os experimentos simulados. Com base nesses resultados, a base refrigerada foi fabricada. O resultado dessa fabricação pode ser observado na imagem presente na Figura 122, que mostra sua montagem sobre a mesa de fixação no Motopos.

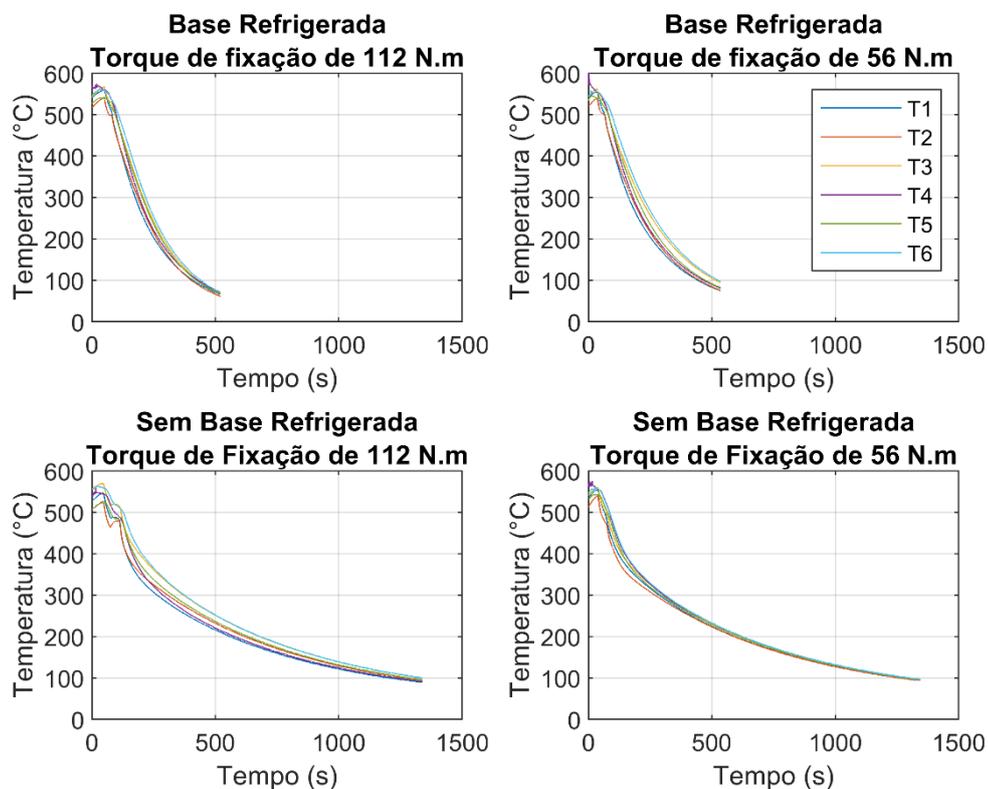
Figura 122 – Resultado da fabricação da base refrigerada para o Motopos.



Fonte: Autor.

Para avaliar a capacidade de troca térmica real, foram realizados experimentos de acordo com a metodologia descrita. Os resultados demonstraram uma redução de 60% no tempo de resfriamento de uma peça de aço carbono A36 com volume de 390 cm<sup>3</sup>, independentemente do torque aplicado para sua fixação. O experimento com resfriamento ativo registrou um tempo de resfriamento de 500s para um  $\Delta T$  de 400 °C, enquanto o experimento sem refrigeração ativa obteve um tempo de resfriamento de aproximadamente 1400s, conforme ilustrado nos gráficos de temperatura apresentados na Figura 123.

Figura 123 – Gráficos do comportamento da temperatura sob diferentes cenários de experimentação.



Fonte: Autor.

Vale ressaltar que, apesar da diferença quase nula observada entre os experimentos variando o torque, o uso de fixadores não é invalidado. É importante destacar que baixos torques têm o potencial de reduzir a pressão de contato entre as partes, o que, por sua vez, pode resultar na diminuição da eficiência da troca térmica entre elas. Portanto, o ajuste adequado do torque dos fixadores é essencial para garantir uma boa transferência de calor e maximizar a eficiência do sistema.

### **5.3.3 Desenvolvimento de algoritmos de controle do processo baseado em sensor infravermelho**

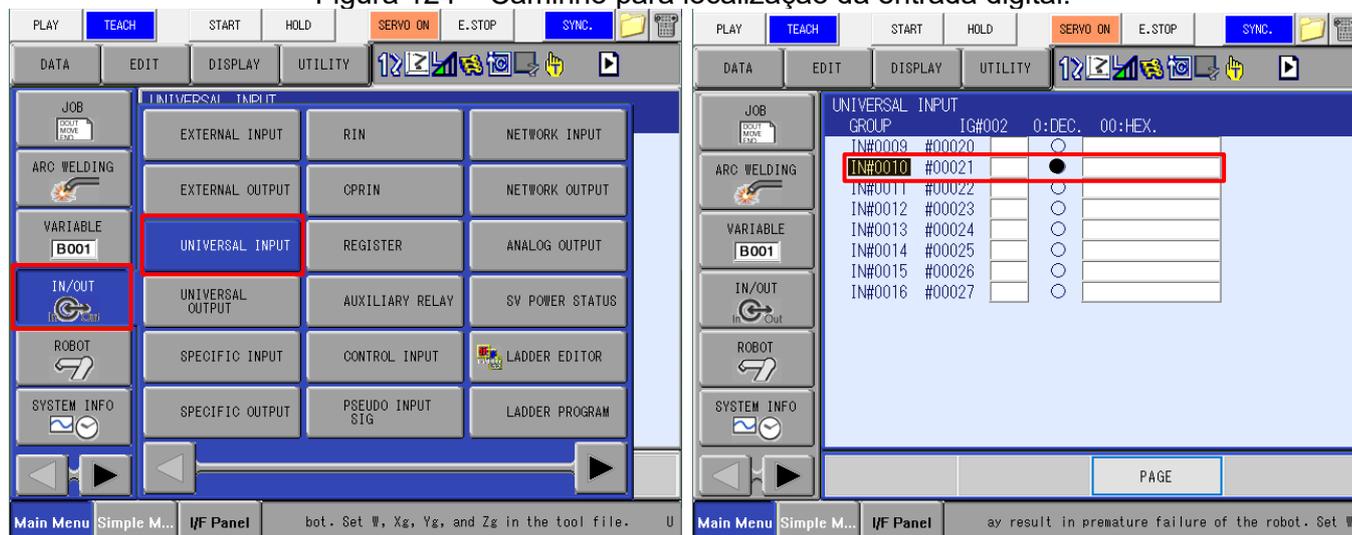
Com o objetivo de obter o máximo desempenho do sistema e evitar paradas desnecessárias no processo de deposição, foi implementado um sistema automatizado de controle de operação, baseado na temperatura da peça. Para isto, integrou-se um sensor de temperatura à célula de soldagem, conforme descrito na metodologia.

Inicialmente, o manual do fabricante foi consultado para identificar os principais recursos do sensor. Constatou-se que o modo de operação do sensor é baseado no tempo, o que significa que os valores de temperatura fornecidos são resultado de um tempo de amostragem pré-programado. Além disso, verificou-se que os recursos de temperatura mínima e máxima correspondem a menor e maior leitura de temperatura durante o período de amostragem. A temperatura média, por outro lado, é calculada como a média dos valores obtidos ao longo desse tempo de amostragem. Em seguida, foi realizado o mapeamento do protocolo de comunicação utilizado pelo sensor, o qual foi identificado como o protocolo MODBUS via USB. Com base nisso, foram determinados os endereços necessários para a criação do algoritmo, sendo estes: O registrador de leitura e escrita, a emissividade, a temperatura mínima, a temperatura média, a temperatura máxima e o tempo de amostragem.

Ao analisar o controlador DX100, integrado à célula Motoman HP20D, constatou-se que o referido controlador possui um abrangente conjunto de entradas e saídas digitais (I/O). Durante o mapeamento desse sistema I/O, verificou-se que o controlador não tem capacidade para receber um sinal analógico, como, por exemplo, um sinal de temperatura do sensor IR, para executar operações condicionais específicas. Diante dessa limitação, foi desenvolvido um algoritmo para integrar o sensor de temperatura ao controlador, no qual os sinais de temperatura são recebidos e, com base em operações condicionais, são convertidos em sinais digitais. Para utilizar esses sinais, foi necessário compreender o processo de criação de um sinal de entrada no controlador. De acordo com o manual de operação, para criar um sinal de entrada digital, é necessário conectar um sinal de 24 V à porta desejada, sendo que essa tensão já está disponível em pelo menos quatro portas da unidade I/O. Ao criar o sinal de entrada, uma porta é habilitada dentro do recurso Universal INPUT no

módulo IN/OUT do sistema de controle do robô. Cada porta está associada a um índice específico, conforme ilustrado no diagrama do Anexo A. Por exemplo, A1 e B7 representam a porta User Input IN10, em que A1 corresponde à porta IN10 e B7 ao sinal de 24 V. A Figura 124 demonstra a aparência da porta IN10 quando ativada.

Figura 124 – Caminho para localização da entrada digital.



Fonte: Autor.

Para enviar o sinal gerado pelo algoritmo e ativar uma entrada digital, é necessário utilizar um circuito integrado (CI) que receba o sinal via conexão serial e o transmita para o controlador. No entanto, nesse caso, é crucial isolar eletricamente o CI do controlador, a fim de evitar qualquer influência da tensão do controlador no circuito do CI. Para atender a esses pré-requisitos, optou-se por utilizar um Arduino UNO como o CI e um módulo relé como o componente de isolamento. O Arduino UNO é responsável por receber o sinal serial e acionar o módulo relé, que, por sua vez, isola eletricamente o circuito do CI do controlador, garantindo um funcionamento adequado.

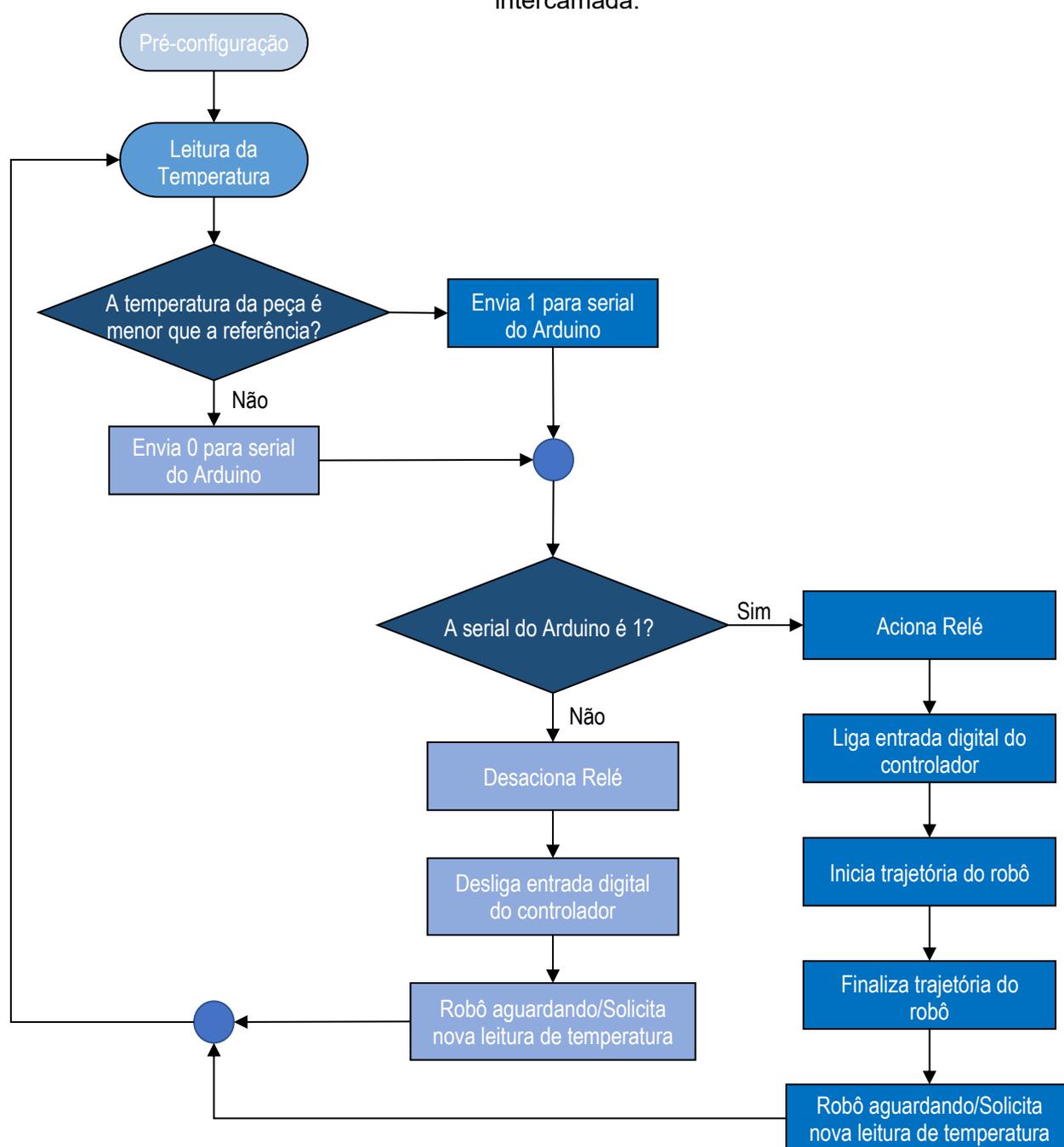
O algoritmo projetado, previamente a leitura e atuação, executa uma etapa de pré-configuração dos parâmetros de emissividade e tempo de amostragem. Para a faixa de temperatura entre 50 °C e 400 °C, também levando em consideração o tipo de superfície, definiu-se um valor de emissividade de 0,78 com base em leituras comparativas entre o sensor e um termopar tipo K. Quanto ao tempo de amostragem, estabeleceu-se um período de um segundo, o que permite obter cinco medições considerando a máxima taxa de aquisição do sensor de 5 Hz. Esses parâmetros foram

determinados com o objetivo de garantir uma operação precisa e adequada do sistema dentro da faixa de temperatura específica.

O algoritmo baseia-se em uma comparação entre a temperatura selecionada e uma temperatura de referência. Nesse algoritmo, é verificado se a temperatura é menor ou maior que a referência, resultando em uma decisão a ser tomada. Essa decisão é então comunicada ao Arduino por meio da comunicação serial, onde é enviada uma mensagem de "1" ou "0". Quando o valor "1" é escrito, indica que o módulo relé conectado à porta de entrada será acionado, alimentando assim a respectiva entrada do controlador. Por outro lado, quando o valor "0" é escrito, o relé permanece desligado ou é desativado, resultando no desligamento da porta correspondente do controlador. Para facilitar a compreensão do algoritmo, um fluxograma ilustrativo está disponível na Figura 125.

Esse sinal, gerado dentro do controlador, pode ser utilizado no recurso de programação, que utiliza a linguagem nativa Inform III, para controlar a execução da operação por meio de comandos específicos, como o comando WAIT ou UNTIL. Tais comandos possibilitam a espera ou a execução condicional até que determinada condição seja atendida. No presente caso, a opção foi pelo comando WAIT, o qual quando comandado implica em aguardar até que a entrada do controlador seja acionada, ou seja, esperar até que a temperatura da peça seja inferior à referência estabelecida. No âmbito deste estudo, o monitoramento da temperatura desempenha um papel essencial, permitindo um controle acurado da temperatura intercamada no processo de fabricação de peças por manufatura aditiva. Essa abordagem visa mitigar os efeitos adversos da variação geométrica decorrente do sobreaquecimento, como detalhado na seção 5.3.1.

Figura 125 – Fluxograma do funcionamento do algoritmo de controle da temperatura intercamada.

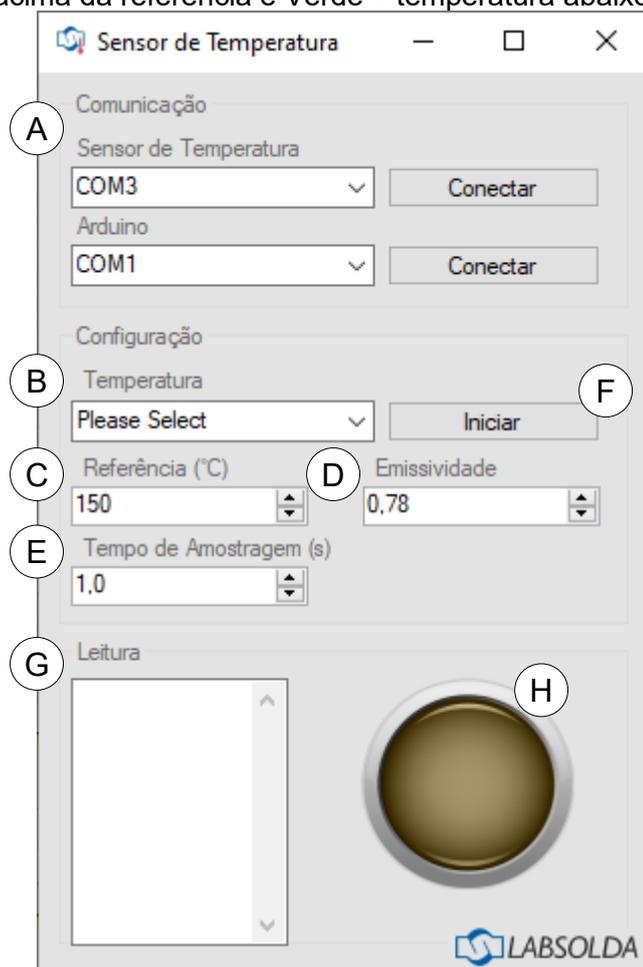


Fonte: Autor.

O algoritmo desenvolvido opera em conjunto com uma Interface Homem-Máquina (IHM) que desempenha um papel crucial no controle e monitoramento do sistema. Através da IHM, é possível visualizar e interagir de maneira intuitiva com as informações e comandos do sistema. A Figura 126 ilustra a aparência da IHM desenvolvida para esse sistema, apresentando os dados de temperatura, os

comandos de controle e outras informações relevantes para o monitoramento e operação do processo.

Figura 126 – IHM projetada para o algoritmo de controle de temperatura, onde: A) Conexão com sensor e Arduino; B) Seleção de parâmetros do sensor, temperatura máxima, mínima e média; C) Configuração da temperatura de referência; D) Configuração da emissividade; E) Configuração do tempo de amostragem F) Comando de Início do algoritmo; G) Leitura instantânea de temperatura e H) Sinal de Status, onde: Amarelo – parado; Vermelho – temperatura acima da referência e Verde – temperatura abaixo da referência.

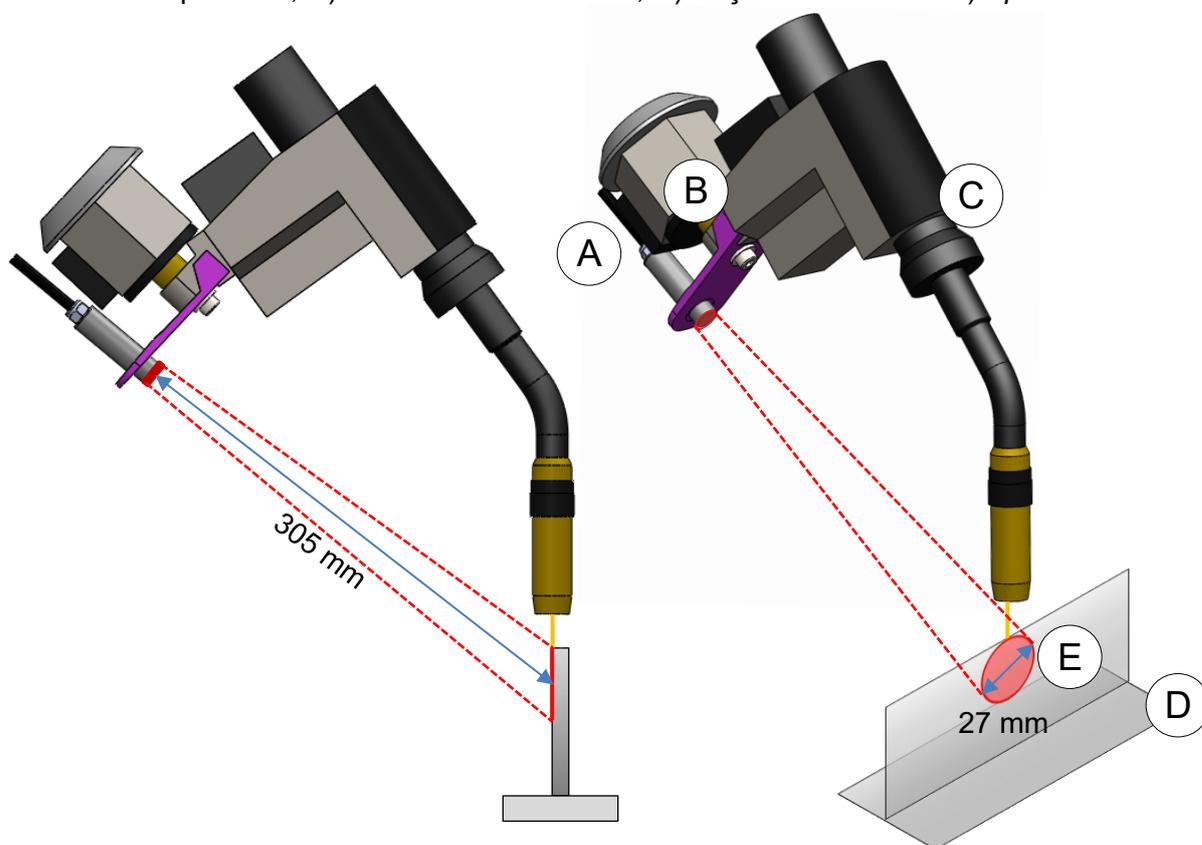


Fonte: Autor.

A posição do sensor em relação à peça é um ponto de discussão desta seção do trabalho. Verificou-se que a localização mais adequada, que oferece segurança para o sensor e permite uma leitura precisa da temperatura em diferentes poses do robô, é na região do sexto eixo. Essa posição permite a leitura do ponto de interesse (ROI - region of interest) em qualquer posição do robô, sem expor o sensor a altas temperaturas do arco, respingos de solda ou possíveis óxidos que podem se desprender da peça. Essa escolha de posicionamento garante a integridade do sensor e contribui para a obtenção de medições confiáveis durante o processo de soldagem.

O sensor de temperatura adotado possui uma relação de distância e tamanho do spot de 20:1, ou seja, o diâmetro do spot é vinte vezes menor que a distância de medição. Com base nessa relação e considerando o posicionamento adotado, foi projetado um suporte específico para garantir que a aquisição da temperatura ocorresse abaixo do limite máximo de uma DBCP de 20 mm. Dessa forma, estabeleceu-se uma distância de 305 mm, o que resultou em um spotsize de aproximadamente 27 mm. As vistas do projeto CAD ilustradas na Figura 127 apresentam detalhes dessa configuração.

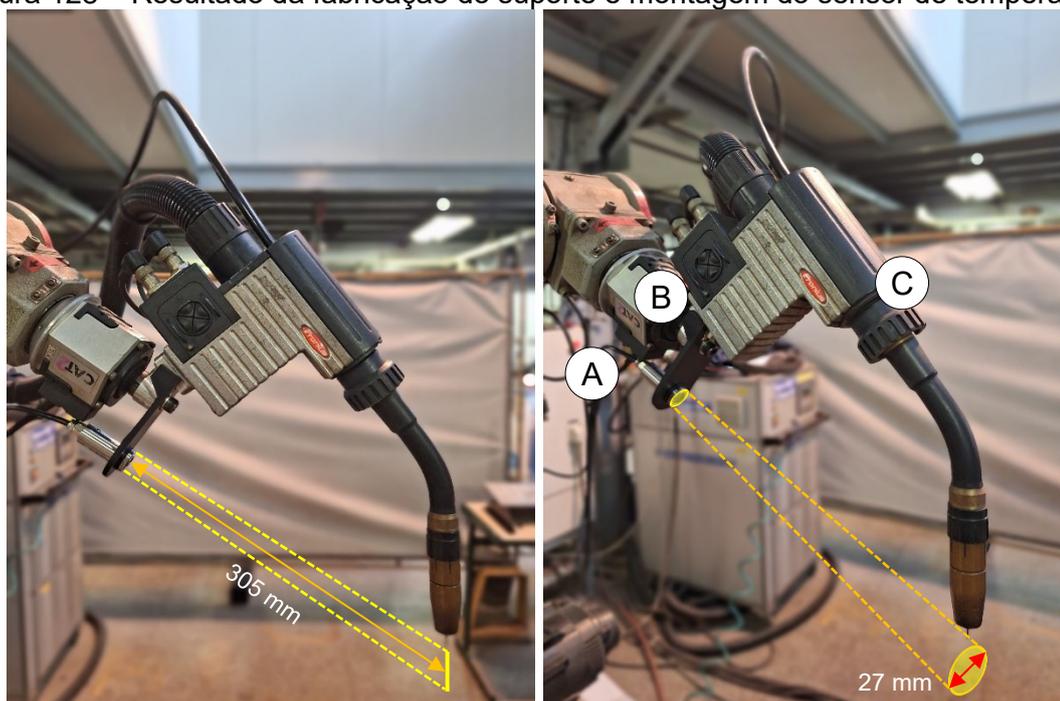
Figura 127 – Esquema do projeto 3D do suporte para o sensor de temperatura infravermelho, onde: A) Sensor de temperatura OMEGA OS-MINIUSB, B) Suporte do sensor de temperatura, C) Tocha Fronius Robact, D) Peça de trabalho e E) Spot size.



Fonte: Autor.

Para a fabricação do suporte, foi escolhida a técnica de impressão 3D utilizando PLA como material de base. Essa escolha se deu devido às propriedades do PLA, que oferece boa resistência mecânica e térmica, sendo adequado para aplicações como esta. A Figura 128 ilustra o resultado da fabricação e montagem do suporte ao robô, demonstrando a integração efetiva do suporte à estrutura do robô.

Figura 128 – Resultado da fabricação do suporte e montagem do sensor de temperatura.



Fonte: Autor.

A validação deste sistema de controle consistiu em realizar a deposição 3D de um cilindro com diâmetro de 60 mm e 180 camadas de altura, conforme descrito na metodologia. Cujas aparências superficiais são apresentadas no registro fotográfico na Figura 129.

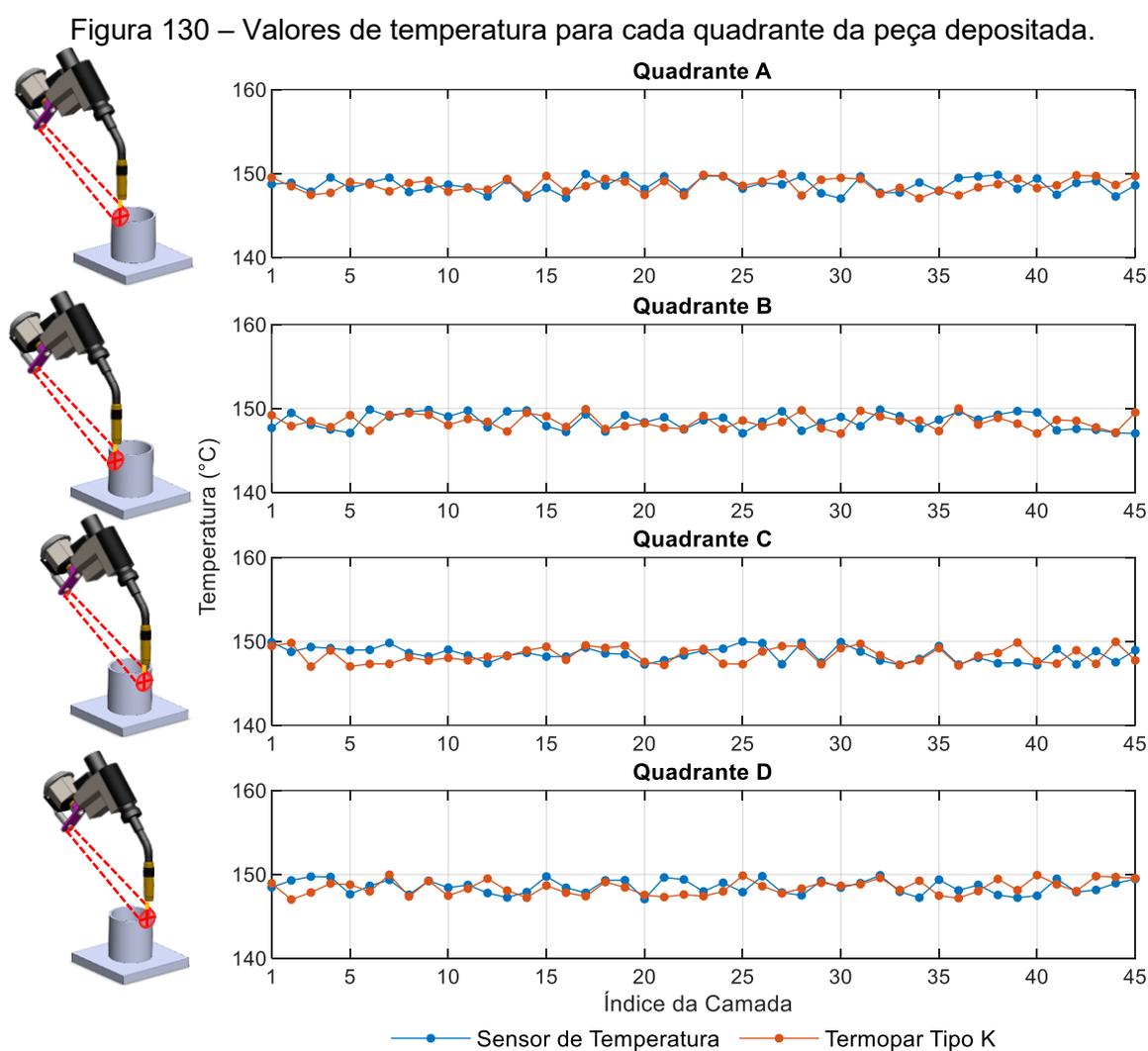
Figura 129 – Aparência superficial do cilindro impresso utilizando o sistema de controle de temperatura.



Fonte: Autor.

O objetivo deste experimento foi controlar a variação geométrica das camadas mantendo a temperatura intercamada constante. Além disso, verificar se a leitura da temperatura seria influenciada pelo quadrante adotado pela tocha de soldagem para a medição de temperatura ao fim de camada.

Os resultados obtidos indicam que não há diferença significativa ( $p > 0,05$ ) entre as leituras feitas com o sensor e o termopar, independentemente do quadrante em que foram realizadas as leituras. Conforme pode ser observado nos gráficos apresentados na Figura 130, que representam as leituras de temperatura para cada quadrante.

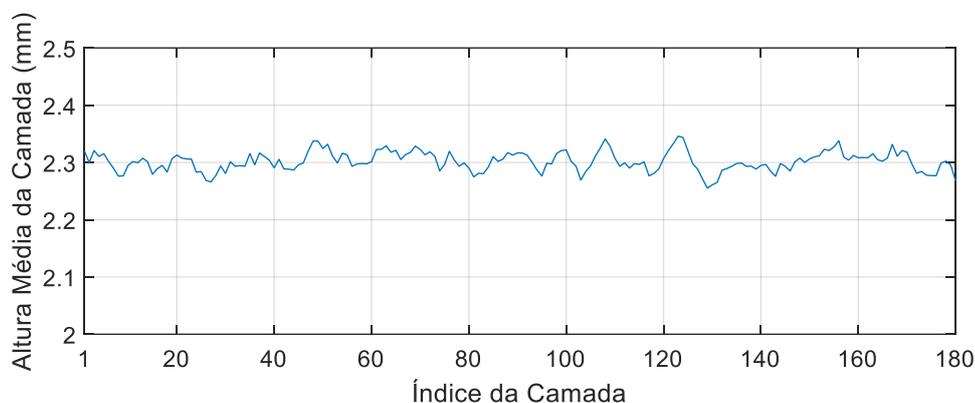


Fonte: Autor.

Além disso, a variação da altura da camada, dado o conjunto amostral, também não apresenta uma variação significativa ( $p > 0,05$ ). A altura média de camada foi 2,31 mm com desvio padrão de 0,03 mm, este resultado corrobora com o

esperado uma vez que a temperatura intercamada, bem como os demais parâmetros dependentes desta variável, foram mantidos constantes. A Figura 131 apresenta o gráfico das leituras de médias em cada camada.

Figura 131 – Medições de altura média de camada para o cilindro impresso.



Fonte: Autor.

Em síntese, conclui-se que o sistema de controle de temperatura intercamada apresenta boa robustez em relação a acurácia na leitura da temperatura. Além disto, com o controle de temperatura e assistido pela base refrigerada foi possível construir uma peça de aproximadamente 415 mm com relativo baixo desvio padrão entre camadas. Portanto, o sistema de controle de temperatura, composto pela base refrigerada e os algoritmos de controle de temperatura intercamada, se mostra adequado para automação do processo de manufatura aditiva, inferindo eficiência e acurácia ao processo. Esses resultados, por sua vez, corroboram com Huang, et al. [62], Ermakova, et al. [63], Silvestru, et al. [65] e Silva, et al. [76], que apresentam resultados semelhantes utilizando metodologias análogas e demonstram melhora no controle da geometria do depósito.

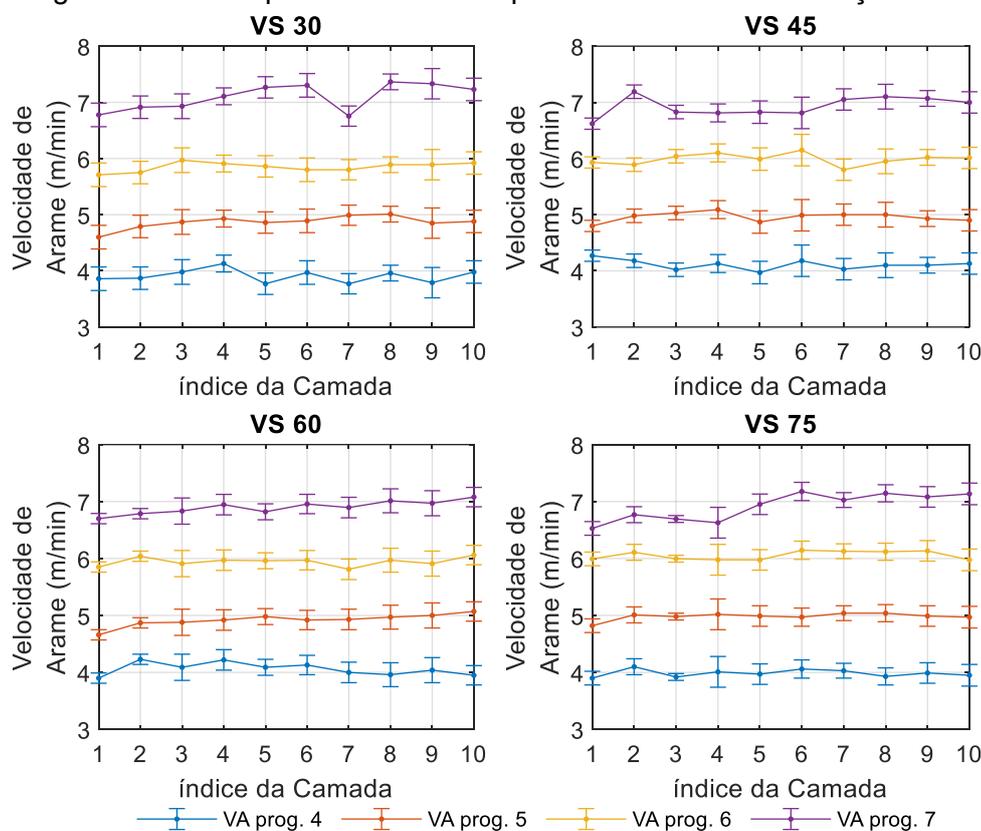
## 5.4 ANÁLISE E CONCEPÇÃO DE DIRETRIZES PARA PREDIÇÃO DE PARÂMETROS NA MANUFATURA ADITIVA

Nesta seção, serão apresentados os resultados referentes a análise e desenvolvimento de algoritmos e modelos para predição e determinação de diretrizes e parâmetros para manufatura aditiva baseando-se no mapeamento do processo de soldagem CMT.

### 5.4.1 Sobreposição vertical

Inicialmente, realizou-se a deposição controlada de paredes para cada conjunto de VA e VD, por meio da aplicação de 10 camadas sobrepostas verticalmente. Para todas as camadas, a DBCP foi mantida em 15 mm e a temperatura intercamada em 100 °C, mantendo assim os parâmetros de soldagem, na média, constantes. A Figura 132 mostra o comportamento da VA média ao longo das 10 camadas para cada conjunto de VA e VD, que se manteve, na média, constante (valores- $p > 0,05$ ).

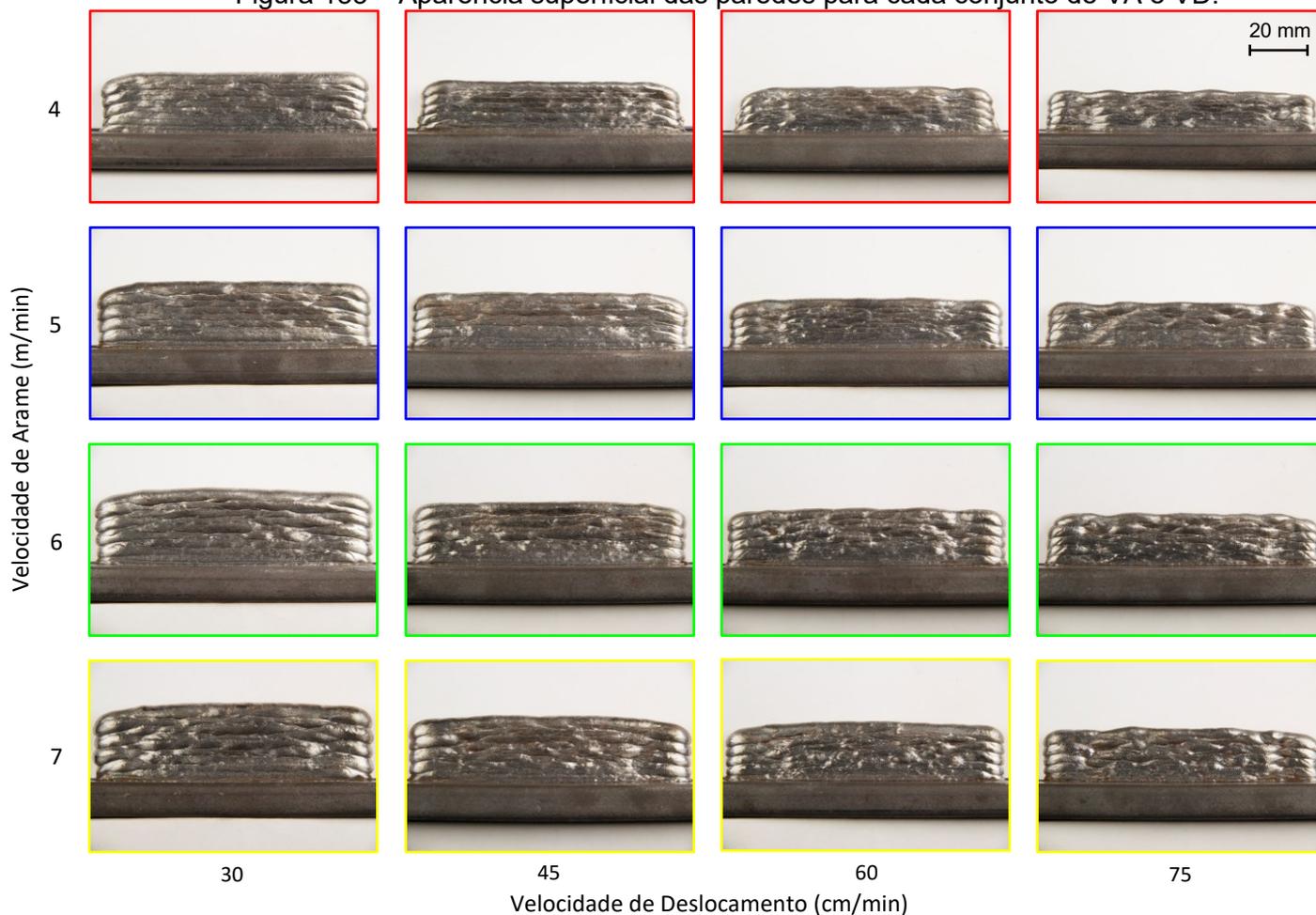
Figura 132 – Comportamento da VA para cada camada em função da VD.



Fonte: Autor.

A aparência das paredes pode ser verificada na Figura 133. Percebe-se uma boa continuidade, com baixos desvios ao longo da seção longitudinal das paredes. Além disso, vale salientar que a trajetória adotada, ou seja, iniciando a camada no fim da anterior, foi benéfica para este padrão contínuo com baixos desvios.

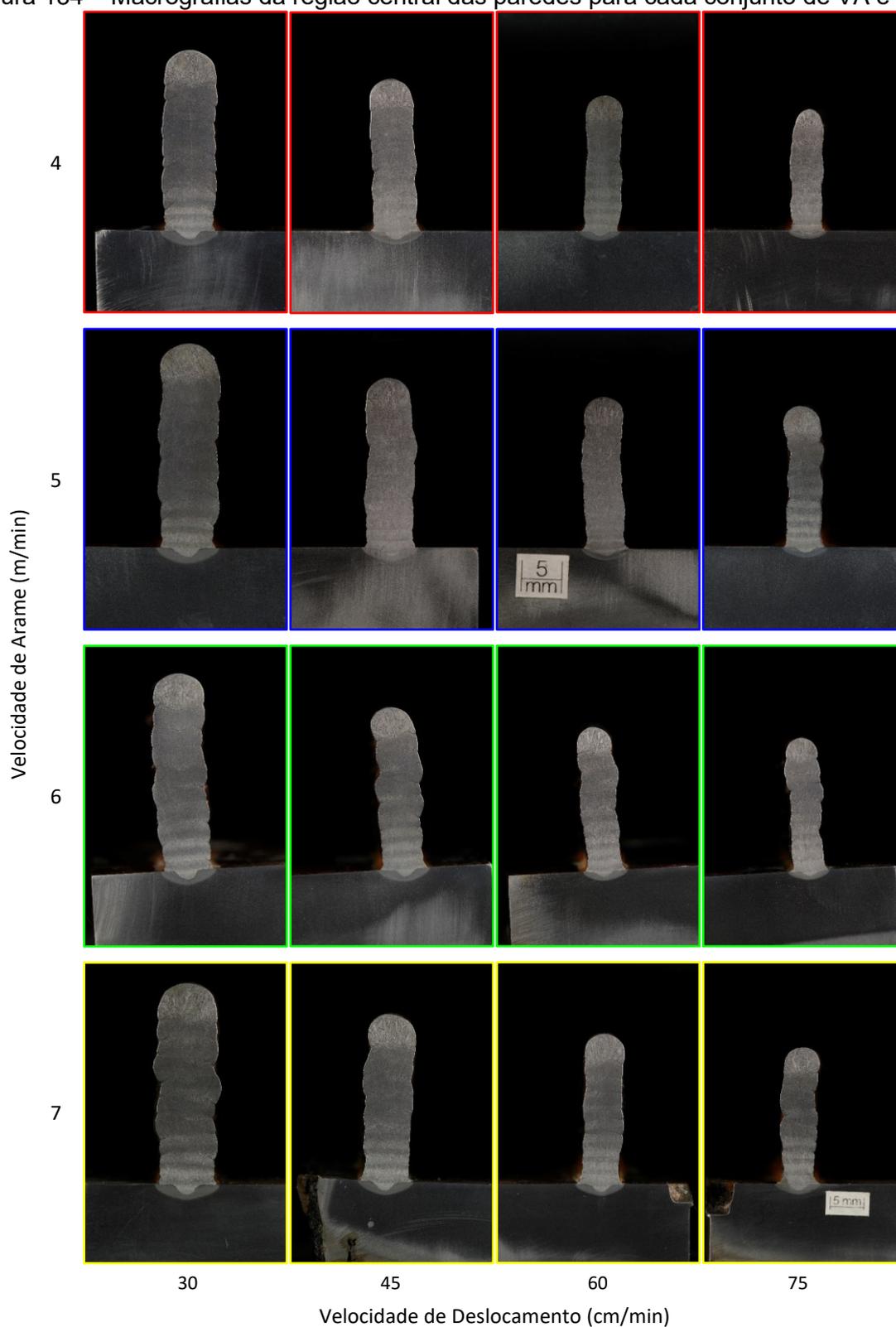
Figura 133 – Aparência superficial das paredes para cada conjunto de VA e VD.



Fonte: Autor.

A Figura 134, a seguir, ilustra as macrografias da região central das paredes. Nota-se poucos desvios na seção transversal da parede, isto é, uma boa continuidade e retilinearidade. Além disso, é possível verificar a isenção de defeitos de soldagem.

Figura 134 – Macrografias da região central das paredes para cada conjunto de VA e VD.



Fonte: Autor.

A análise do perfil geométrico das paredes foi dividida em duas partes: largura e altura, conforme descrito na metodologia. Ao analisar a largura média das paredes,

observou-se um baixo desvio padrão, o que corrobora as afirmações acerca do processo CMT, conferindo elevada estabilidade geométrica e repetibilidade aos depósitos. A Tabela 22 ilustra as medições realizadas ao longo da seção longitudinal das paredes, apresentando também a média e o desvio padrão dessas medições. Nota-se que a largura das paredes tende a aumentar à medida que se aumenta a VA programada e diminuir à medida que se aumenta a VD. Comparando a largura média da parede com a largura do cordão simples para o seu respectivo parâmetro se observa um erro percentual que apresenta uma tendência de ser maior que o respectivo cordão simples, ou seja, a parede tende a ser mais larga que o cordão base.

Tabela 22 – Largura média das paredes para cada conjunto de VA e VD.

VA Prog. (m/min)	VD (cm/min)	L1	L2	L3	L4	L5	Média	Desvio Padrão	Cordão Simples	Desvio Padrão	Diferença	Erro Percentual
4.0	30	7.21	7.04	7.06	7.09	7.08	7.10	0.07	6.66	0.11	0.43	6%
	45	6.38	6.18	6.10	5.90	6.12	6.14	0.17	5.74	0.03	0.40	6%
	60	5.01	4.85	4.87	5.08	5.00	4.96	0.10	5.52	0.04	-0.56	-11%
	75	4.70	4.42	4.34	4.70	5.00	4.63	0.26	4.83	0.05	-0.20	-4%
5.0	30	7.99	7.91	7.94	7.73	8.00	7.91	0.11	7.53	0.01	0.38	5%
	45	6.31	6.70	6.64	6.32	6.68	6.53	0.20	6.61	0.03	-0.08	-1%
	60	5.53	5.39	5.57	5.70	5.66	5.57	0.12	6.11	0.08	-0.54	-10%
	75	5.45	4.95	4.91	5.48	5.19	5.20	0.27	5.70	0.03	-0.51	-10%
6.0	30	9.45	8.92	8.31	8.55	8.46	8.74	0.46	7.42	0.03	1.32	15%
	45	7.54	7.24	7.42	7.00	7.00	7.24	0.24	6.82	0.03	0.42	6%
	60	6.13	5.36	6.09	5.88	5.87	5.87	0.31	6.34	0.02	-0.47	-8%
	75	6.34	5.30	5.65	5.22	5.73	5.65	0.44	5.60	0.04	0.05	1%
7.0	30	9.68	9.55	9.69	9.90	10.00	9.76	0.18	8.50	0.03	1.27	13%
	45	7.94	7.97	7.75	8.08	7.65	7.88	0.17	7.59	0.14	0.28	4%
	60	6.54	6.70	6.52	6.36	7.13	6.65	0.29	6.74	0.07	-0.09	-1%
	75	6.65	6.50	6.50	6.19	5.91	6.35	0.30	6.43	0.11	-0.08	-1%

Fonte: Autor.

Ao analisar a altura das paredes, observou-se também um baixo desvio padrão ao longo da seção longitudinal. A Tabela 23 apresenta os dados das medições realizadas, destacando a altura média da camada. Neste caso, também há uma tendência de a parede apresentar cordões mais altos para velocidades de soldagem menores e velocidades de arame maiores. Além disso, comparando a altura média da camada com o cordão base observa-se uma redução percentual da altura.

Tabela 23 – Altura média das paredes para cada conjunto de VA e VD.

VA Prog. (m/min)	VD (cm/min)	A1	A2	A3	A4	A5	Média	Desvio Padrão	Cordão Simples	Desvio Padrão	Diferença	Erro Percentual
4.0	30	2.28	2.23	2.24	2.25	2.24	2.25	0.02	2.5	0.08	-0.20	-9%
	45	1.90	1.90	1.91	1.90	1.87	1.90	0.01	2.0	0.01	-0.09	-5%
	60	1.69	1.71	1.72	1.74	1.69	1.71	0.02	1.9	0.06	-0.15	-9%
	75	1.53	1.52	1.54	1.52	1.54	1.53	0.01	1.6	0.06	-0.08	-5%
5.0	30	2.51	2.57	2.53	2.59	2.57	2.55	0.03	3.1	0.07	-0.50	-19%
	45	2.08	2.16	2.15	2.16	2.12	2.14	0.04	2.3	0.04	-0.13	-6%
	60	1.90	1.95	1.94	1.93	1.87	1.92	0.04	2.0	0.06	-0.06	-3%
	75	1.75	1.77	1.79	1.74	1.67	1.74	0.04	1.8	0.04	-0.04	-2%
6.0	30	2.79	2.86	2.92	2.95	2.90	2.88	0.06	3.2	0.04	-0.34	-12%
	45	2.36	2.42	2.43	2.43	2.40	2.41	0.03	2.5	0.02	-0.07	-3%
	60	2.10	2.19	2.11	2.13	2.14	2.13	0.03	2.2	0.01	-0.03	-1%
	75	1.92	2.01	2.00	1.99	1.92	1.97	0.04	2.0	0.02	-0.03	-1%
7.0	30	2.89	2.98	3.01	3.01	3.01	2.98	0.05	3.4	0.06	-0.45	-15%
	45	2.44	2.51	2.52	2.49	2.43	2.48	0.04	2.8	0.08	-0.32	-13%
	60	2.15	2.24	2.24	2.25	2.20	2.22	0.04	2.3	0.03	-0.04	-2%
	75	1.95	2.06	2.03	2.04	2.02	2.02	0.04	2.1	0.06	-0.10	-5%

Fonte: Autor.

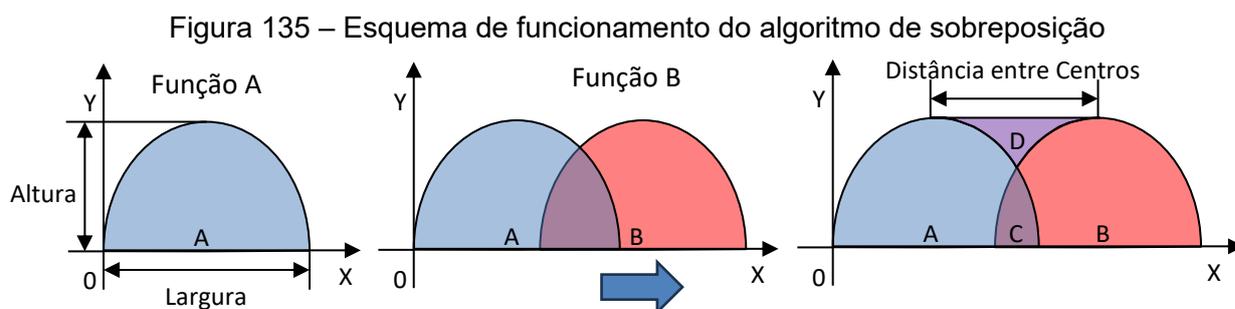
Portanto, é possível inferir que, na construção das paredes, os cordões tendem a apresentar larguras levemente maiores e alturas levemente menores do que as do cordão base. Este dado é de suma importância para os próximos passos do desenvolvimento do algoritmo de predição de parâmetros. Pois essas diferenças serão implementadas como correções no algoritmo de seleção de parâmetros, que utiliza o cordão simples, mapeado no capítulo 5.2., como base para a definição dos parâmetros.

#### 5.4.2 Sobreposição horizontal

A sobreposição horizontal de cordões na manufatura aditiva é o que irá possibilitar a fabricação de peças com espessura além da nominal, definida por um único cordão simples. Na literatura, é possível notar que a sobreposição horizontal de cordões depositados é objeto de análise em muitos trabalhos, em geral, cada autor procura definir um método otimizado para suas aplicações, tentando considerar o máximo de variáveis e condições de contorno possível para que o modelo resultante seja assertivo e convergente com as situações reais a serem aplicadas, conforme Ding et al. [14], Xiong et al. [72, 79, 105] e Suryakumar et al. [71] mostram em seus

trabalhos. Em resumo, cada método busca definir a distância ideal entre os cordões a serem sobrepostos baseando-se em um algum parâmetro prévio.

Baseando-se nos métodos dos autores citados e utilizando o software Matlab 2020a, desenvolveu-se um novo método que utiliza apenas a largura e altura do cordão de solda para modelar uma função de segundo grau que interpole a seção transversal do cordão, onde a distância entre suas raízes seja igual à largura do cordão (Função A). A partir desta função, outra função igual é criada, porém defasada (Função B). Com isto, inicia-se uma rotina de sobreposição que desloca no eixo X a segunda função e compara as áreas C e D, até que elas sejam iguais ou muito próximas. Na sequência, a distância entre os centros das parábolas é calculada e assim a distância de sobreposição é definida. O funcionamento do algoritmo de sobreposição pode ser observado na representação gráfica na Figura 135.



Fonte: Autor.

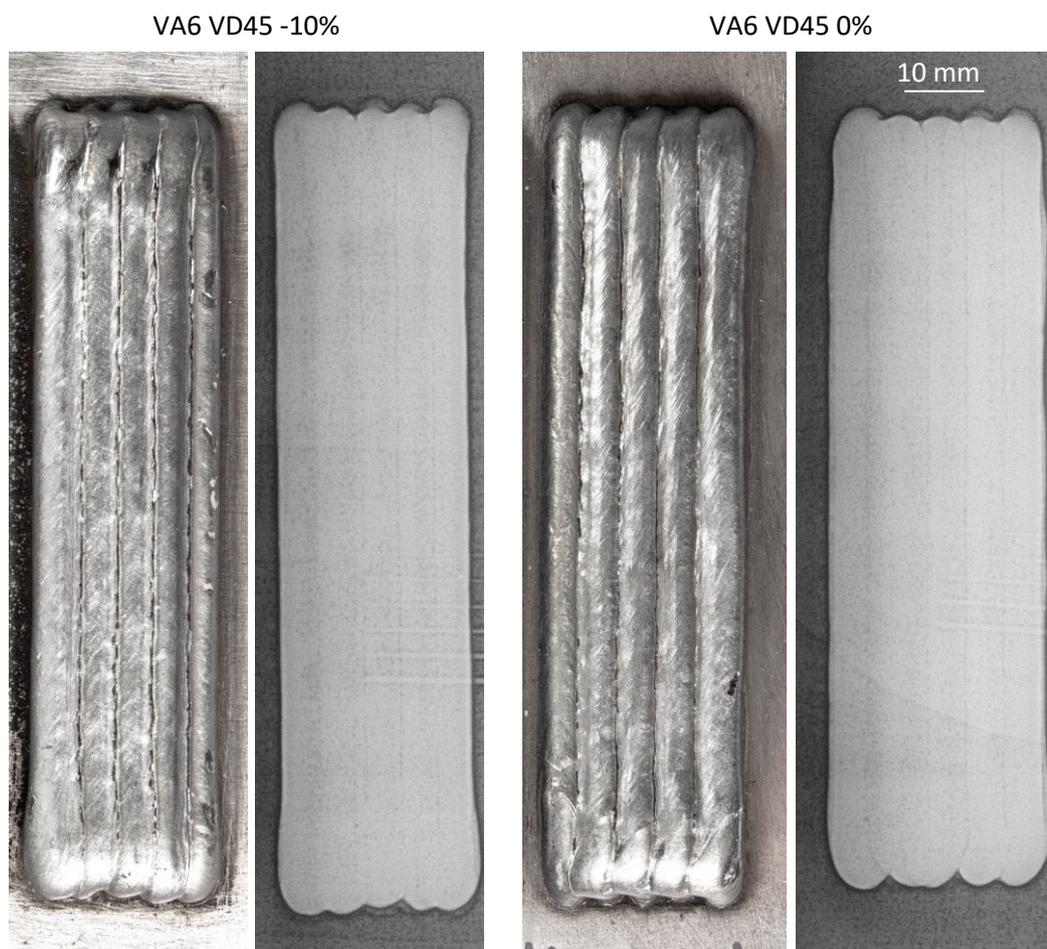
Para validar o algoritmo de sobreposição, conforme descrito na metodologia, fabricou-se blocos de duas camadas com 5 cordões sobrepostos horizontalmente, variando o valor calculado em -10 e +10%, concentrando-se na geometria final do depósito. Os parâmetros de VA e VD utilizados foram baseados na tabela de parâmetros gerada no mapeamento do processo, considerando a DBCP de 15 mm.

Como primeiro resultado, verificou-se que para toda a faixa operacional selecionada o cálculo da sobreposição, ou seja, da distância entre centros resultou em um valor muito próximo de 67% da largura do cordão base, corroborando com os trabalhos de Gierth, et al. [67], Ding, et al. [14], Xiong, et al. [72, 79, 105] e Suryakumar et al. [71], que apresentam valores entre 65 e 70%.

De maneira geral, o algoritmo apresentou um bom desempenho, isto é, utilizando a distância entre centros foi possível obter blocos sem defeitos e com aparência superficial plana, mesmo aproximando os cordões nos casos com

decréscimo de 10% da distância entre centros. A Figura 136 ilustra alguns exemplos de peças que apresentaram boa qualidade tanto externa (Foto na esquerda) quanto interna (Raio-x na direita).

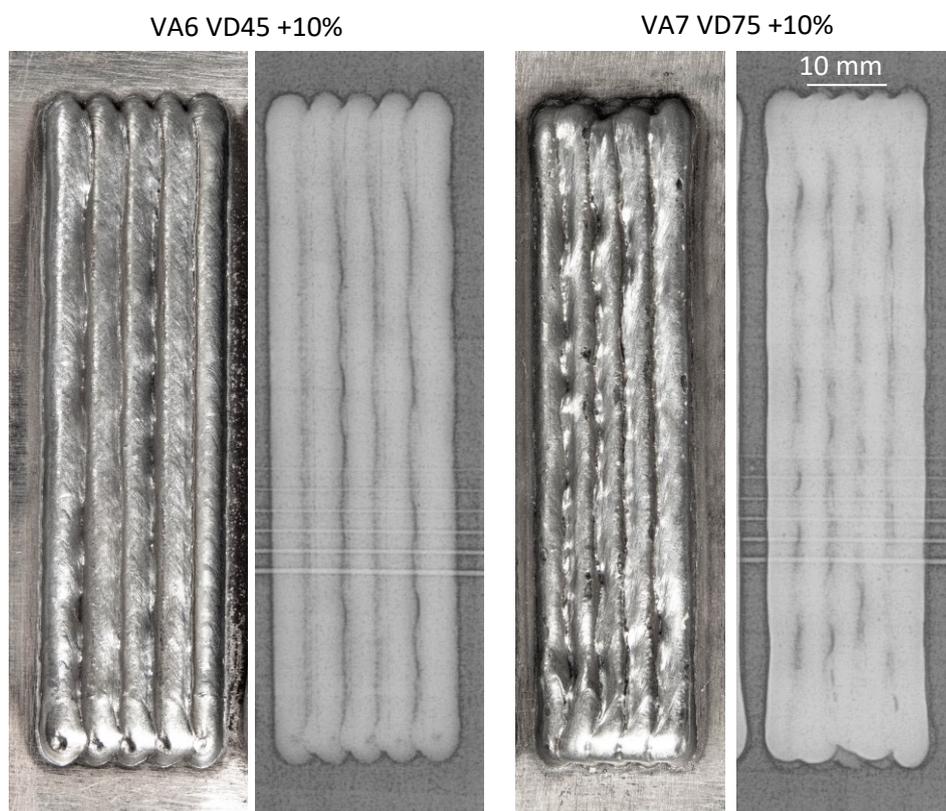
Figura 136 – Aparência superficial de blocos com boa qualidade depositados para validação do algoritmo de sobreposição.



Fonte: Autor.

Contudo, vale destacar alguns exemplos que apresentaram falhas. Em geral, as falhas foram observadas para os casos em que a velocidade de deslocamento estava na faixa de 60 e 75 cm/min e nas condições de sobreposição com acréscimo de distância de 10%. A Figura 137 apresenta alguns destes exemplos de falhas externas (Foto na esquerda) e internas (Raio-x na direita). Vale destacar que este tipo de defeito pode comprometer a integridade mecânica da peça final comprometendo sua aplicação. Este tipo de falha ocorre devido à distância excessiva entre a poça de fusão e o flanco do cordão já depositado. A poça formanda não funde completamente o flanco e incorre na não coalescência destes, ou seja, uma sobreposição incompleta.

Figura 137 – Aparência superficial de blocos com baixa qualidade depositados para validação do algoritmo de sobreposição.



Fonte: Autor.

Com base nestes experimentos, pode-se concluir que o algoritmo de sobreposição proposto é eficiente para prever a distância entre centros dos cordões. Contudo, vale destacar que a distância deve ser controlada de modo que não exceda o valor nominal mais 10%, para assim, evitar falhas e defeitos. Por outro lado, a diminuição da distância, apesar de não comprometer a integridade da peça, aumenta o número de cordões necessários para fabricar uma peça de mesma largura que com a distância nominal. Além disso, também se observa que utilizando uma distância entre centros de cordões de 67% da largura do cordão base se obtêm sobreposições adequadas para operações de manufatura aditiva.

A partir de uma análise do comportamento da largura das sobreposições e visto que a distância entre centros tende a ser um valor de 67% da largura do cordão, foi possível modelar matematicamente a predição da largura dos blocos ou paredes espessas. Como resultado desta modelagem, tem-se a equação (26), a qual descreve matematicamente a largura dos depósitos sobrepostos.

$$L_t = L + N_s (L \cdot C_s) \quad (26)$$

Onde:

$L_t$  = Largura Total (mm);

$L$  = Largura do cordão (mm);

$N_s$  = Número de sobreposições;

$C_s$  = Constante de sobreposição (0.67).

Para testar e validar o modelo aplicou-se a equação (26) sobre os dados gerados na deposição dos blocos. Utilizando a largura do cordão base e o número de sobreposições, foi possível calcular a largura teórica do bloco para cada experimento realizado. A Tabela 24, apresenta os dados referentes as medições e cálculos realizados aplicando este método.

Tabela 24 – Dados de medições e da largura dos blocos e largura teórica.

ID	VA Prog. (m/min)	VD (cm/min)	Largura (mm)	Desvio Padrão	Distância nominal (mm)	Offset (%)	Distância Corrigida (mm)	Largura Mensurada (mm)	Largura Calculada (mm)	Erro Percentual	
E01	4.0	30	6.66	0.11	4.47	-10	4.02	21.74	21.87	-1%	
E02			6.66	0.11	4.47	0	4.47	23.24	24.54	-6%	
E03			6.66	0.11	4.47	10	4.92	25.35	27.20	-7%	
E04		45	30	5.74	0.03	3.85	-10	3.46	18.14	18.83	-4%
E05				5.74	0.03	3.85	0	3.85	20.24	21.13	-4%
E06				5.74	0.03	3.85	10	4.23	22.35	23.42	-5%
E07		60	45	5.52	0.04	3.75	-10	3.37	18.17	18.29	-1%
E08				5.52	0.04	3.75	0	3.75	19.51	20.50	-5%
E09				5.52	0.04	3.75	10	4.12	22.23	22.71	-2%
E10		75	60	4.83	0.05	3.25	-10	2.93	15.10	15.90	-5%
E11				4.83	0.05	3.25	0	3.25	16.87	17.83	-6%
E12				4.83	0.05	3.25	10	3.58	19.23	19.77	-3%
E15	5.0	30	7.53	0.01	5.05	-10	4.55	25.71	24.73	4%	
E16			7.53	0.01	5.05	0	5.05	27.71	27.74	0%	
E17			7.53	0.01	5.05	10	5.56	29.37	30.76	-5%	
E18		45	30	6.61	0.03	4.37	-10	3.94	21.39	21.46	0%
E19				6.61	0.03	4.37	0	4.37	23.31	24.10	-3%
E20				6.61	0.03	4.37	10	4.81	25.90	26.75	-3%
E21		60	45	6.11	0.08	4.09	-10	3.68	19.21	20.01	-4%
E22				6.11	0.08	4.09	0	4.09	20.54	22.45	-9%
E23				6.11	0.08	4.09	10	4.49	23.35	24.90	-7%
E24		75	60	5.70	0.03	3.81	-10	3.43	17.67	18.66	-6%
E25				5.70	0.03	3.81	0	3.81	19.86	20.94	-5%

E26		5.70	0.03	3.81	10	4.19	22.17	23.22	-5%
E27		7.42	0.03	4.94	-10	4.44	23.61	24.20	-2%
E28	30	7.42	0.03	4.94	0	4.94	29.48	27.16	8%
E29		7.42	0.03	4.94	10	5.43	33.15	30.13	9%
E30		6.82	0.03	4.63	-10	4.16	23.80	22.59	5%
E31	45	6.82	0.03	4.63	0	4.63	25.77	25.32	2%
E32		6.82	0.03	4.63	10	5.09	27.66	28.05	-1%
E33		6.34	0.02	4.19	-10	3.77	19.57	20.57	-5%
E34	60	6.34	0.02	4.19	0	4.19	21.41	23.10	-8%
E35		6.34	0.02	4.25	10	4.68	24.66	25.89	-5%
E36		5.60	0.04	3.76	-10	3.39	18.58	18.42	1%
E37	75	5.60	0.04	3.76	0	3.76	20.58	20.66	0%
E38		5.60	0.04	3.76	10	4.14	23.13	22.90	1%
E39		8.50	0.03	5.68	-10	5.12	30.69	27.83	9%
E40	30	8.50	0.03	5.68	0	5.68	33.03	31.23	5%
E41		8.50	0.03	5.68	10	6.25	35.35	34.63	2%
E42		7.59	0.14	5.01	-10	4.51	26.35	24.60	7%
E43	45	7.59	0.14	5.01	0	5.01	28.43	27.64	3%
E44		7.59	0.14	5.01	10	5.51	31.89	30.68	4%
E45		6.74	0.07	4.54	-10	4.09	22.48	22.22	1%
E46	60	6.74	0.07	4.54	0	4.54	24.21	24.91	-3%
E47		6.74	0.07	4.54	10	5.00	27.36	27.61	-1%
E48		6.43	0.11	4.35	-10	3.91	19.84	21.24	-7%
E49	75	6.43	0.11	4.35	0	4.35	22.77	23.82	-5%
E50		6.43	0.11	4.35	10	4.78	24.76	26.39	-7%

Fonte: Autor.

Comparando a largura mensurada com a largura teórica ou calculada, verificou-se uma assertividade satisfatória do método, com um erro percentual máximo de -9% e médio de -2%. Este erro médio sugere que a largura mensurada do bloco é inferior ou apresenta valores menores que a calculada. Para a utilização deste método no algoritmo de predição de parâmetros, esse erro será considerado como um fator de segurança para mitigar possíveis desvios geométricos e considerar um sobremetal na peça a ser impressa. Dado este erro, reescreveu-se a equação (26) obtendo-se a equação (27), a qual considera a diferença lida nos experimentos.

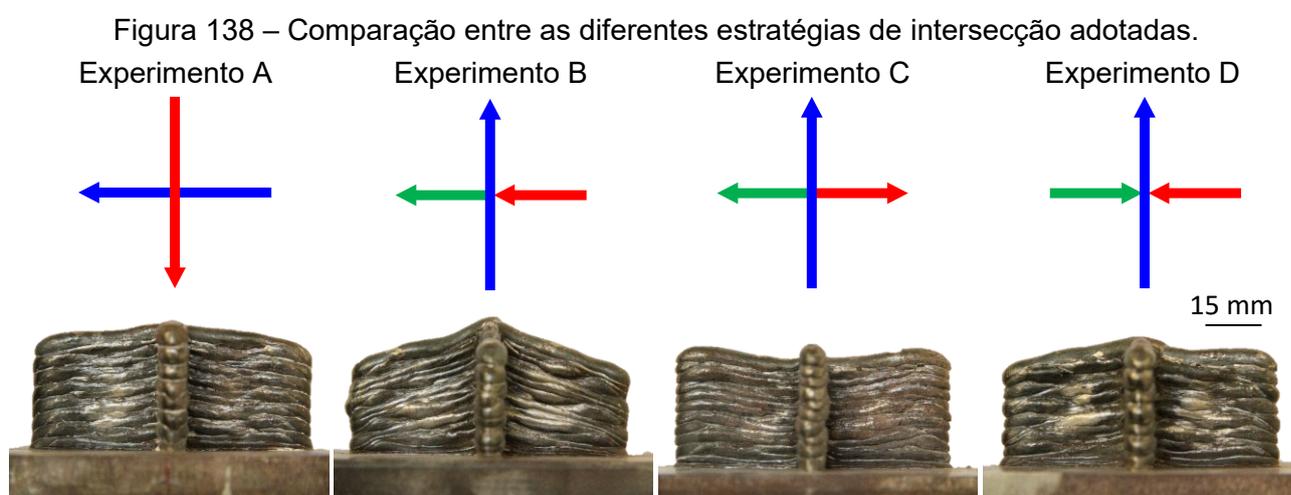
$$L_t = (L + N_s(L \cdot C_s)) C_r \quad (27)$$

Onde:

$C_r$  = Correção percentual relativo à diferença entre o mensurado e o calculado.

### 5.4.3 Estratégias de intersecção de cordões

A intersecção de cordões na manufatura aditiva é uma problemática que também foi abordada no escopo deste trabalho, uma vez que, sua aplicação é de suma importância para fabricação de peças com moderada e elevada complexidade. Nestes termos, conforme descrito na metodologia, realizou-se a deposição de peças com 10 camadas de altura variando a perfil de sobreposição. A Figura 138 mostra o plano frontal das peças.

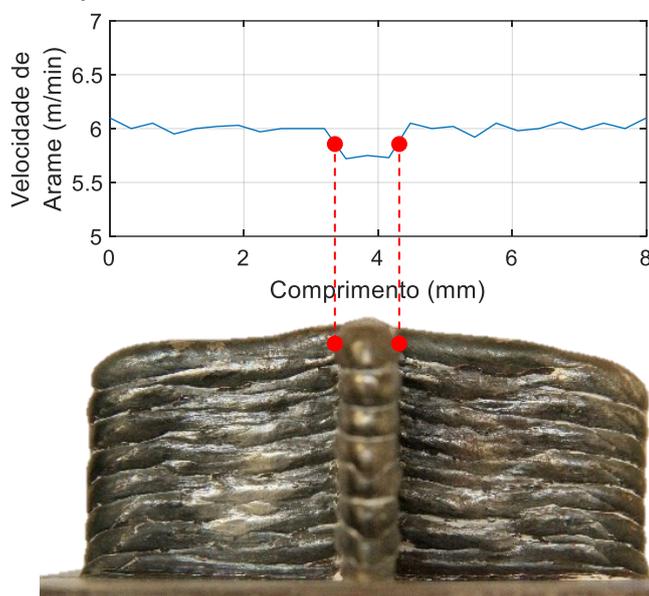


Fonte: Autor.

Analisando a geometria das peças e intersecções resultantes, verificou-se que para este caso o cruzamento direto (experimento A) é a opção mais interessante. Pois verificou-se o menor desvio geométrico quando comparado com as demais condições. Para o experimento B, observou-se uma certa continuidade na geometria da intersecção. Contudo, também se verificou um leve acúmulo de material na região de intersecção. No caso do experimento C, notou-se um forte acúmulo de material na região de intersecção. Este acúmulo de material verificado nas regiões de intersecção é devido o início do cordão, que em função a temperatura do substrato e das condições de formação e aquecimento da poça geram estes pontos de excesso de material. No experimento D, por outro lado, verificou-se o contrário, uma depressão na região de intersecção, ou seja, uma falta de material, decorrente do fim do cordão ou parada do processo de soldagem, que por interromper a transferência de metal e mantendo o arco aberto por alguns instantes gera uma pressão positiva sobre a poça ainda líquida que induz um espalhamento da porção líquida presente neste ponto.

Voltando ao experimento A, verificou-se a influência de um efeito já estudado neste trabalho, que foi a variação da DBCP e sua influência sobre a VA. Como neste caso a intersecção ocorre durante o processo o sistema de controle da fonte de soldagem atua sobre a VA em tempo real e reduz momentaneamente a VA, reduzindo assim a quantidade de material transferido para a peça. Este fenômeno induz a variação do perfil geométrico, diminuindo a altura do cordão, gerando assim uma intersecção plana e uniforme. Esta afirmação pode ser comprovada observando a curva de VA durante a intersecção, por exemplo, para a camada 7, que mostra esta redução de VA, conforme a Figura 139.

Figura 139 – Comportamento da VA média durante a intersecção dos cordões.



Fonte: Autor.

Em síntese, foi possível verificar que a estratégia de intersecção de cordões mais apropriada para este estudo, com cordões simples, foi a intersecção direta sem qualquer pausa ou interferência, pois o próprio controle da fonte de soldagem atua de modo a compensar a variação devido de altura (DBCP) alterando a VA média e entregando mais ou menos material em função disto. Comparando com o trabalho de Sousa et al. [75], verificou-se que os resultados apresentam similaridade. No entanto, Sousa et al. [75] não definiram um padrão como ideal, pois não observaram diferenças significativas entre os padrões, com exceção da taxa de resfriamento. No presente estudo, por outro lado, foram observadas variações significativas no perfil geométrico entre as condições de intersecção, com exceção da condição de intersecção em trajeto contínuo.

#### 5.4.4 Estratégias de conexão de cordões e avaliação de geometrias triangulares

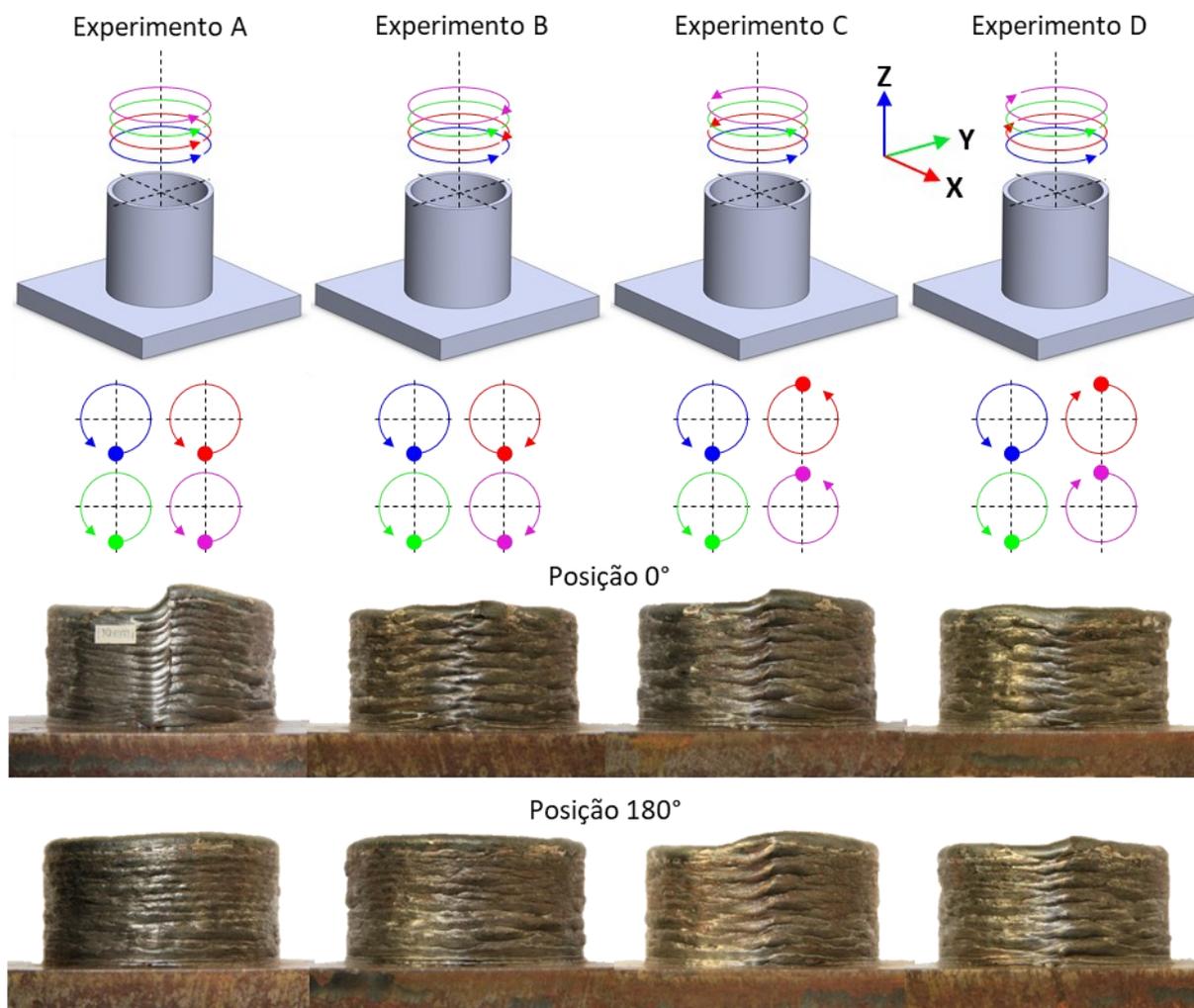
A conexão de entre os cordões também é um parâmetro fundamental para a fabricação de peças por manufatura aditiva, uma vez que, na prática, as peças são baseadas em geometrias fechadas e não apenas paredes. Neste sentido, foi realizado um estudo variando as estratégias de conexão entre início e fim de cordão para verificar qual é a mais apropriada. Conforme descrito na metodologia, foram fabricados cilindros e cubos com quatro variações de conexão.

Para os experimentos com os cilindros, conforme ilustrado na Figura 140, que apresenta a aparência das peças fabricadas com detalhes na região de conexão entre o início e o fim do cordão, observou-se que o experimento A, embora tenha apresentado boa coesão entre as camadas, apresentou resultados insatisfatórios para a conexão entre o início e o fim do cordão, manifestando uma depressão na região de interseção. Acredita-se que essa depressão seja decorrente de um erro de forma acumulado devido ao final do cordão, que tende a formar um perfil côncavo devido à redução da velocidade de alimentação ainda com o arco aberto, e ao modo de solidificação da poça que gera o perfil mencionado. O mesmo efeito de depressão na região de interseção também pode ser observado, mas em menor intensidade, para o experimento C. Ambos os experimentos têm como característica comum o mesmo sentido de soldagem das camadas, mudando apenas o ponto de início e fim das camadas pares, que para o experimento C foram defasadas  $180^\circ$  das ímpares.

Em geral, na construção de paredes (geometrias abertas), a literatura sugere, para mitigar esse tipo de defeito, a inversão de sentido de soldagem a cada camada, assim como foi realizado nos experimentos B e D, [73, 119, 120]. Essas afirmações corroboram com os resultados práticos obtidos tanto para o experimento B quanto para o experimento D. No experimento B, além de uma boa coesão entre as camadas, observou-se uma boa coesão entre as interseções entre o início e o fim do cordão, mesmo mantendo o ponto de início e fim igual para todas as camadas. Da mesma forma, o experimento D também apresentou boa coesão entre as camadas e o ponto de início e fim destas. No entanto, neste experimento, aplicou-se uma defasagem de  $180^\circ$  do ponto de início e fim das camadas em relação ao ponto de início das camadas pares. A vantagem desta defasagem do ponto de início e fim das camadas reside na

distribuição de tensões oriundas dos ciclos térmicos, aos quais a peça está exposta. [9, 41, 55, 66, 121].

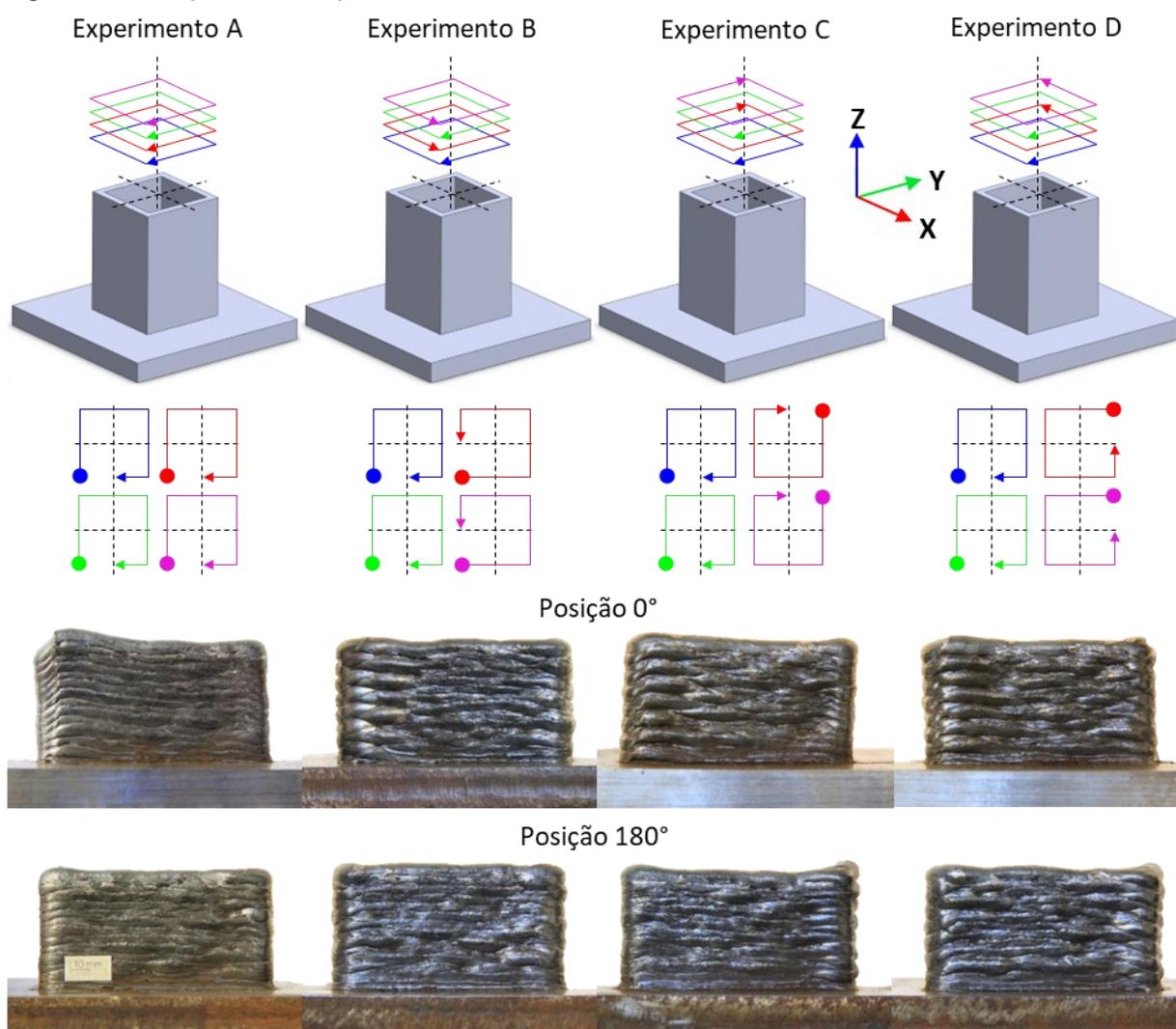
Figura 140 – Aparência superficial dos cilindros com detalhe nas diferentes conexões testadas.



Fonte: Autor.

Os resultados dos experimentos utilizando a geometria cúbica estão descritos conforme mostra a Figura 141. Da mesma forma que nos experimentos com as peças cilíndricas, observou-se uma depressão acentuada no ponto de início e fim no experimento A. No entanto, para seu equivalente, ou seja, o experimento C, não foi constatada uma depressão expressiva, sugerindo que esse defeito pode ser acentuado em função da região em que o ponto de início e fim está localizado. Neste caso, por estar situado em um canto, apenas a defasagem do ponto de início e fim entre as camadas ímpares e pares foi suficiente para mitigar o defeito. Quanto aos experimentos B e D, observou-se, de maneira semelhante ao experimento C, uma boa coesão entre as camadas e no ponto de início e fim.

Figura 141 – Aparência superficial dos cubos com detalhe nas diferentes conexões testadas.



Fonte: Autor.

Além dos experimentos para analisar as diferentes conexões entre os cordões, foram realizados experimentos variando o ângulo de curvatura dos cantos. Conforme descrito na metodologia, para este estudo foi realizada a fabricação de triângulos com ângulos variando entre 30, 45, 60 e 90°. A Figura 142 mostra a aparência superficial destas peças.

A partir destes experimentos, foi possível avaliar que em toda a faixa de ângulos explorada, houve uma boa coesão entre as camadas. Porém, na região com o ângulo de 30°, observou-se um leve acúmulo de material em comparação com as demais. Este acúmulo é resultado da variação de velocidade de deslocamento executada pelo robô, uma vez que, nessa região, o robô realiza uma desaceleração, levando a uma redução momentânea da velocidade de deslocamento programada e, como consequência, uma maior deposição de material na região. No entanto, apesar

desse resultado, não se considera que esse leve acúmulo seja um problema, uma vez que a peça, de maneira geral, apresentou boa qualidade.

Figura 142 – Aparência superficial dos triângulos com diferentes ângulos.



Fonte: Autor.

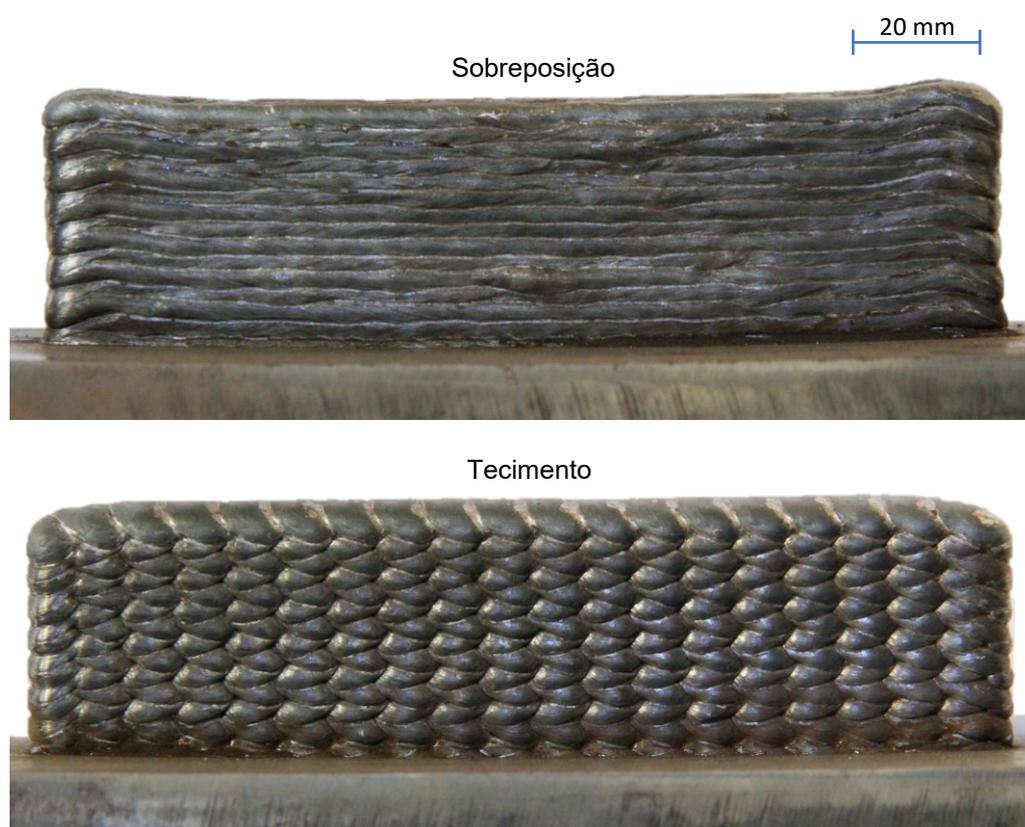
Em síntese, foi possível constatar que a estratégia de conexão mais adequada entre os cordões depositados, tanto para geometrias cilíndricas quanto para geometrias retangulares, está no experimento D. Esse experimento envolve a inversão do sentido de soldagem (horário e anti-horário) entre camadas ímpares e pares, juntamente com a defasagem do ponto de início e fim do cordão. Adicionalmente, observou-se que a impressão de peças com a tecnologia CMT é capaz de absorver variações angulares em peças triangulares, mesmo diante de variações de velocidade decorrentes da desaceleração do manipulador. Vale ressaltar que as afirmações feitas são válidas para a faixa de VA de até 6 m/min, podendo haver diminuição no desempenho para VAs maiores.

#### 5.4.5 Análise de diferentes estratégias de deposição

A influência da estratégia de deposição também foi um ponto avaliado neste trabalho. Conforme descrito na metodologia, foram realizados experimentos utilizando duas estratégias distintas de deposição. A primeira consistiu em sobreposições de cordões, enquanto a segunda envolveu o uso de tecimento ou oscilação da tocha.

A Figura 143 apresenta a aparência superficial das paredes, onde é possível observar que ambas exibem regularidade, continuidade e ausência de defeitos. No entanto, para a parede fabricada utilizando tecimento, notou-se uma textura superficial mais pronunciada. Além disso, nas medições da largura das paredes, constatou-se um baixo desvio padrão, com valores médios de 25,16 mm para a parede com sobreposição e 25,86 mm para a parede com tecimento, e desvios padrão de 0,23 e 0,62, respectivamente. Esses resultados corroboram a eficácia do método de sobreposição horizontal proposto, o qual foi aplicado para a definição dos parâmetros de soldagem utilizados nestes experimentos.

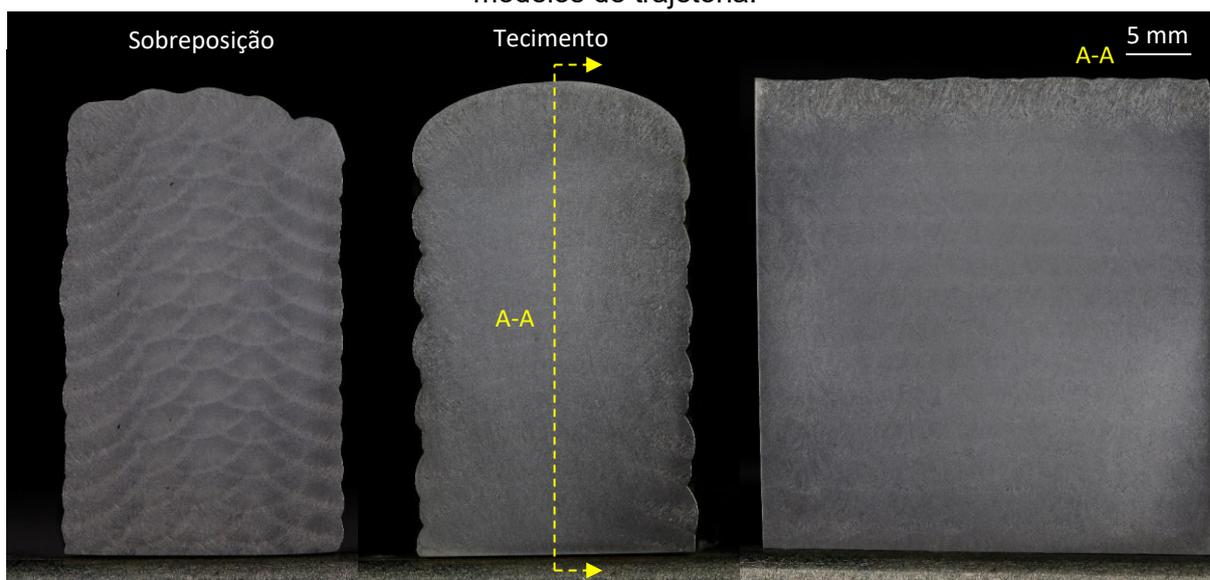
Figura 143 – Aparência superficial as paredes fabricadas utilizando os dois modelos de trajetória.



Fonte: Autor.

Analisando as macrografias das paredes apresentadas na Figura 144, notou-se a ausência de defeitos internos em ambas as condições. Além disso, observou-se uma maior homogeneidade na estrutura para o caso com tecimento, enquanto para o caso com sobreposições, identificou-se uma Zona Afetada pelo Calor (ZAC) mais proeminente. Com base nesses resultados, pode-se conjecturar que a estratégia de tecimento tende a promover uma distribuição mais uniforme do calor durante o processo de soldagem, resultando em uma microestrutura mais homogênea. Por outro lado, as sobreposições podem gerar uma maior concentração de calor em certas regiões, levando à formação de uma Zona Afetada pelo Calor mais evidente. Essas observações ressaltam a importância da escolha da estratégia de deposição na obtenção de características desejadas nos depósitos de solda, como a uniformidade da microestrutura e a minimização de efeitos indesejados, como a ZAC.

Figura 144 – Macrografias da região central das paredes fabricadas utilizando os dois modelos de trajetória.



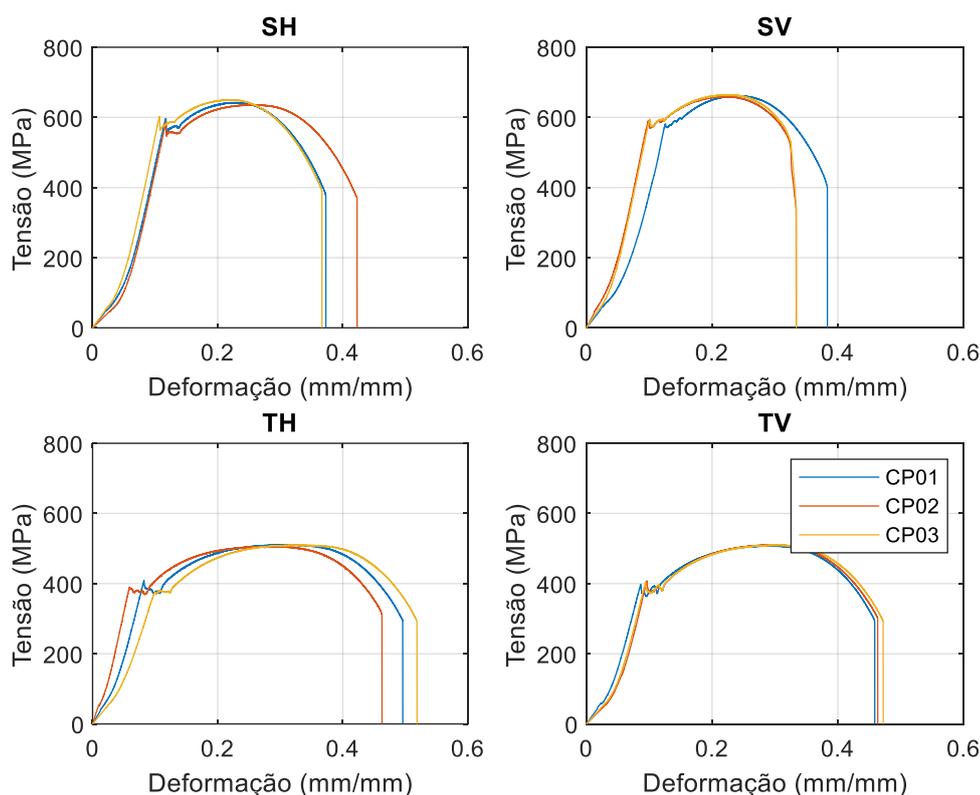
Fonte: Autor.

Após a análise das macrografias das paredes fabricadas sob diferentes condições de deposição, procedeu-se aos ensaios de tração para investigar as propriedades mecânicas e possíveis variações anisotrópicas nas paredes. Os resultados indicaram ausência de defeitos internos em ambas as condições de deposição, sugerindo uma boa integridade estrutural dos depósitos. No entanto, a observação de uma maior homogeneidade na estrutura das paredes fabricadas com tecimento em comparação com aquelas com sobreposições aponta para potenciais diferenças nas propriedades mecânicas entre os dois tipos de trajetória. Essas

diferenças podem influenciar significativamente o comportamento mecânico dos materiais em situações de carregamento.

Como resultado dos ensaios de tração, os gráficos de tensão x deformação, apresentados na Figura 145, retratam os corpos de prova extraídos tanto na direção horizontal (SH) quanto na vertical (SV) para a parede com sobreposições, e na direção horizontal (TH) e vertical (TV) para a parede com tecimento.

Figura 145 – Gráficos de tensão x deformação resultantes dos ensaios de tração.



Fonte: Autor.

As principais propriedades obtidas com os ensaios de tração estão resumidas na Tabela 25. Ao analisar esses dados, observa-se que as amostras SH e SV apresentaram uma tensão de escoamento e uma tensão máxima maiores do que as amostras TH e TV. Além disso, as amostras SH e SV demonstraram um maior alongamento durante a fase elástica, antes do ponto de proporcionalidade ou transição. No entanto, as amostras TH e TV exibiram um maior alongamento total, ou seja, um maior alongamento após a ruptura. Adicionalmente, as amostras SH e SV mostraram uma maior resiliência, enquanto as amostras TH e TV apresentaram uma maior tenacidade.

Tabela 25 – Dados experimentais dos ensaios de tração.

ID	Código	Alongamento no Escoamento (%)	Alongamento após ruptura (%)	Tensão de Escoamento (MPa)	Tensão Máxima (MPa)	Resiliência (J/m <sup>3</sup> )	Tenacidade (J/m <sup>3</sup> )
E01		11.69	24.80	595.92	642.39	25.85	175.02
E02	SH	11.76	31.06	586.56	635.88	24.30	201.31
E03		10.71	27.68	602.65	650.24	24.33	177.98
E04		12.63	25.22	576.49	661.56	26.86	182.41
E05	SV	9.90	25.64	591.05	659.89	23.17	168.30
E06		10.11	25.10	594.10	665.03	23.49	168.51
E07		8.24	35.98	407.15	510.95	13.39	204.52
E08	TH	5.84	35.24	384.80	506.77	10.12	195.73
E09		9.99	37.78	374.83	510.83	15.15	207.77
E10		8.69	30.38	395.68	507.63	13.36	183.00
E11	TV	9.65	30.52	405.93	510.60	13.84	182.28
E12		9.43	31.12	404.28	510.01	13.72	186.91

Fonte: Autor.

Adicionalmente, para investigar se as características mecânicas das amostras diferem estatisticamente e, portanto, determinar a presença de anisotropia nas paredes, foram conduzidos testes de hipótese (ANOVA). Os testes de hipótese realizados compararam as amostras SH e SV, TH e TV, SH e TH, e SV e TV, conforme ilustra os valores- $p$  presentes na Figura 146.

Figura 146 – Valores- $p$  referentes ao teste de hipótese aplicado sobre dados resultantes dos ensaios de tração.

SH - SV	0.6202	0.2366	0.3359	0.0119	0.8147	0.2872
TH - TV	0.3757	0.002	0.2651	0.9538	0.6364	0.0086
SH - TH	0.0545	0.0123	0	0	0.0016	0.1192
SV - TV	0.1534	0	0	0	0	0.0877
	Along. Escoamento	Along. Total	Tensão Esc.	Tensão Max.	Resiliência	Tenacidade

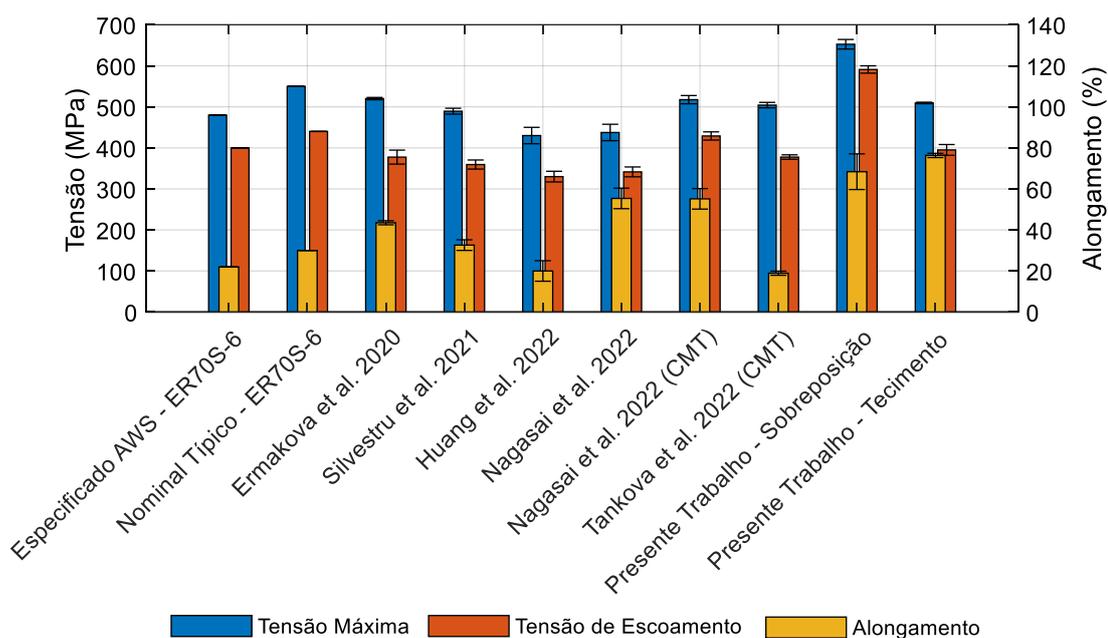
Fonte: Autor.

As análises dos testes de hipótese revelaram que, para as amostras SH e SV, não houve diferença significativa entre as médias (valores- $p > 0,05$ ), exceto para a tensão máxima, onde foi observada uma diferença estatisticamente significativa (valores- $p < 0,05$ ). Similarmente, para as amostras TH e TV, não foram encontradas diferenças significativas, com exceção do alongamento total e da tenacidade. No entanto, entre as amostras SH e TH, foi identificada uma diferença estatisticamente significativa, exceto para o alongamento no escoamento e a tenacidade. Este padrão se repetiu entre as amostras SV e TH. Embora não seja possível afirmar definitivamente a presença de anisotropia entre as direções, observou-se que, para

as amostras SH e SV, houve diferenças significativas nas tensões máximas, enquanto para TH e TV, as diferenças foram encontradas nos alongamentos. Ademais, foi constatada uma diferença significativa entre os modelos de trajetória utilizados.

Comparando os resultados com a literatura, com o especificado pela AWS e valores típicos para a liga ER70S-6, verificou-se que nos experimentos realizados nesta tese, utilizando o CMT, tanto as estratégias de sobreposição quanto de tecimento, juntamente com as diretrizes de controle, resultaram em valores de tensão máxima, tensão de escoamento e alongamento que, na média, superam os valores encontrados na literatura relacionada. Comparando com os valores especificados pela AWS apenas o experimento utilizando sobreposição superou os especificados. O experimento com tecimento apresenta valores maiores para o especificado pela AWS e valores inferiores para os nominais típicos. Contudo, comparando a literatura com os especificados pela AWS e fabricante verifica-se quase que de maneira absoluta valores inferiores ao especificado. Isto demonstra que os métodos desenvolvidos conferem boa resistência às peças fabricadas a partir desse aço, o qual é comumente utilizado em operações industriais de soldagem estrutural. A Figura 147 apresenta um comparativo gráfico entre os resultados lidos na literatura analisada na revisão bibliográfica e os resultados obtidos neste trabalho.

Figura 147 - Faixa de valores de tensão máxima, tensão de escoamento e alongamento para peças de manufatura aditiva fabricados em AWS ER70S6 relatados na literatura.



Fonte: Autor.

## 5.5 VALIDAÇÃO DO ALGORITMO DE PREDIÇÃO DE DIRETRIZES E PARÂMETROS PARA MANUFATURA ADITIVA

Para validação do algoritmo, conforme descrito na metodologia, foram fabricadas peças utilizando todos os métodos e diretrizes desenvolvidos neste estudo, com o objetivo de testar a eficácia, robustez e a aplicabilidade dos métodos propostos na prática.

A peça cilíndrica com ressalto, cuja aparência superficial pode ser observada na Figura 148, apresentou aparência satisfatória, caracterizada pela continuidade e pela ausência de defeitos superficiais.

Figura 148 – Resultado da fabricação do cilindro com ressalto.



Fonte: Autor.

As medições efetuadas para esta peça demonstraram uma proximidade considerável com os valores nominais para ambos os segmentos, evidenciando um baixo desvio, como ilustrado na Tabela 26.

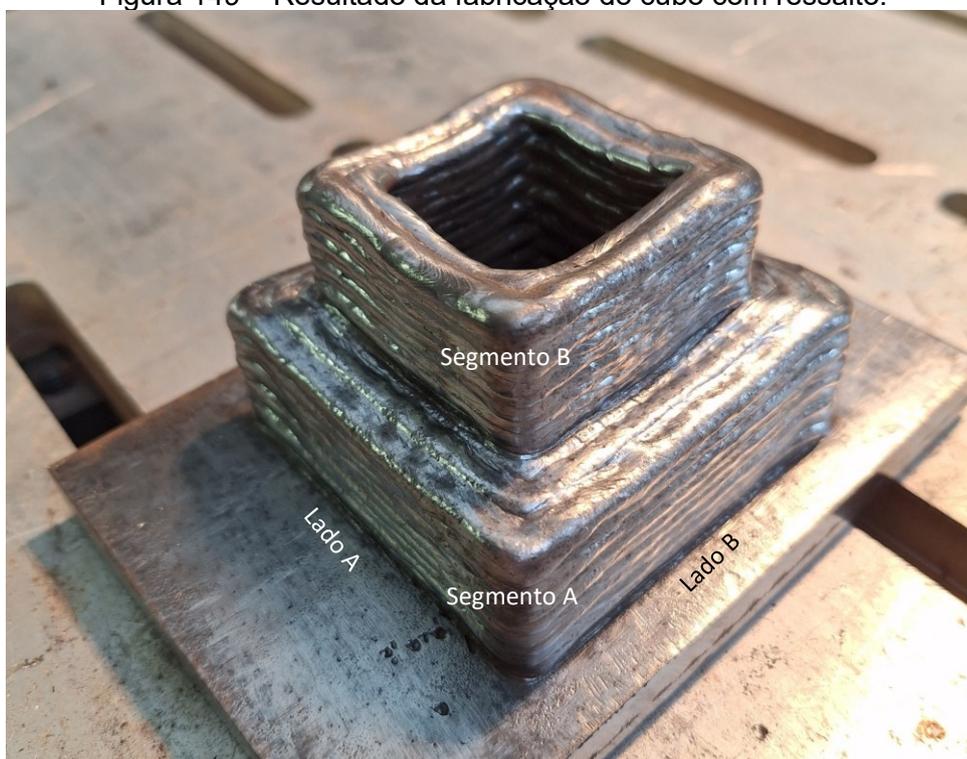
Tabela 26 – Medições realizadas na peça cilíndrica com ressalto.

Característica	Segmento A			Segmento B		
	Nominal (mm)	Média (mm)	Desv. Pad (mm)	Nominal (mm)	Média (mm)	Desv. Pad (mm)
Diâmetro Externo	75	77.2	0.5	50	53.4	0.4
Espessura da Parede	22.5	23.8	0.4	10	11.2	0.3
Altura	25	26.5	0.3	25	26.6	0.4

Fonte: Autor.

A peça cúbica com ressaltos também apresentou aparência satisfatória, continuidade e sem incidência de defeitos superficial, conforme pode ser visualizado na Figura 149.

Figura 149 – Resultado da fabricação do cubo com ressalto.



Fonte: Autor.

As medições correspondentes a esta peça estão detalhadas na Tabela 27. Ao analisar e comparar essas medições em relação aos valores nominais, observou-se uma aproximação considerável para ambos os segmentos.

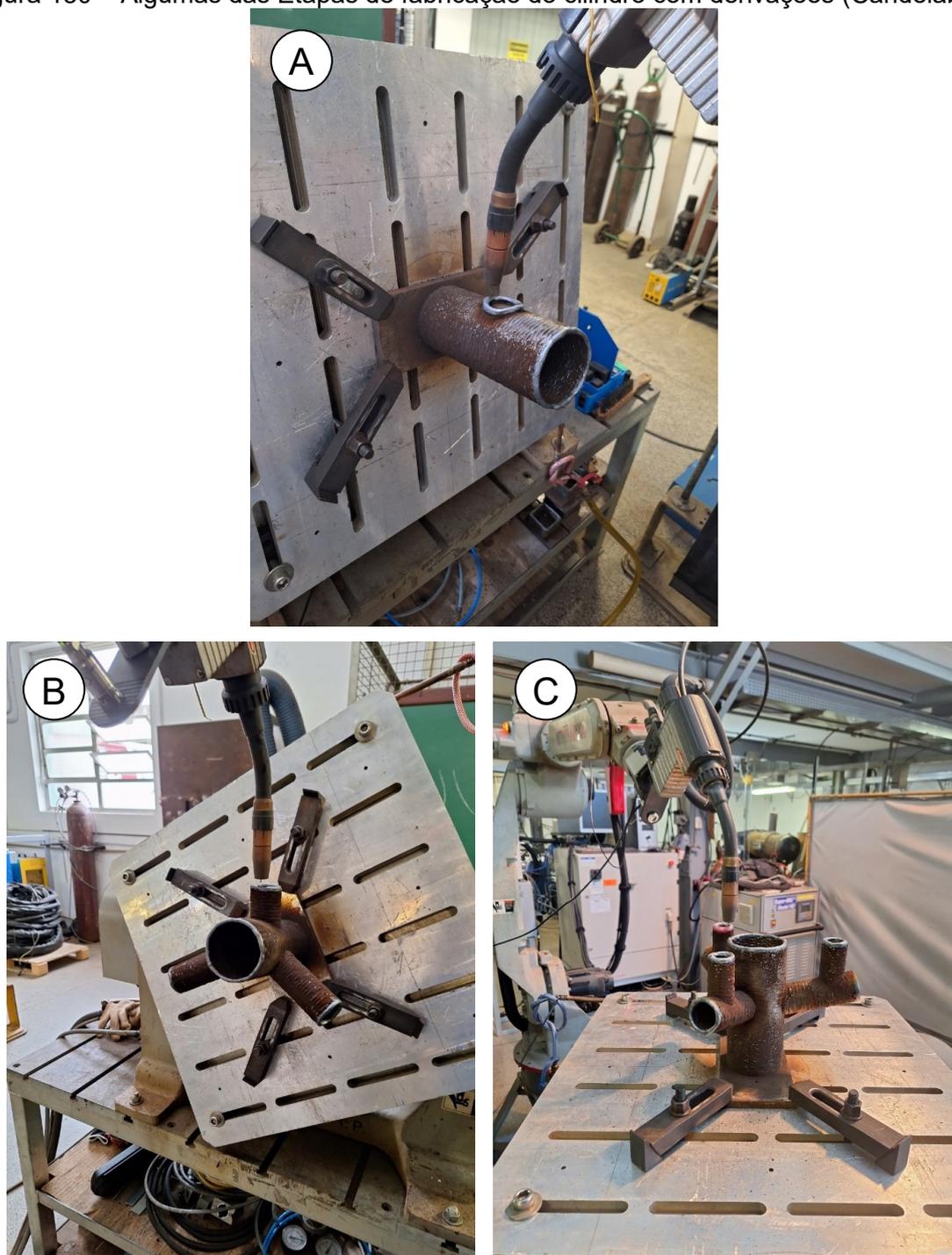
Tabela 27 – Medições realizadas na peça cúbica com ressalto.

Característica	Segmento A			Segmento B		
	Nominal (mm)	Média (mm)	Desv. Pad (mm)	Nominal (mm)	Média (mm)	Desv. Pad (mm)
Lado A	75	77.1	0.4	50	53	0.4
Lado B	75	76.7	0.3	50	52.3	0.5
Espessura da Parede A	22.5	23.1	0.2	10	11.1	0.3
Espessura da Parede B	22.5	23.5	0.3	10	11.2	0.3
Altura A	25	27.1	0.4	25	27.4	0.4
Altura B	25	27.5	0.3	25	27.7	0.4

Fonte: Autor.

Além das peças de parede espessa, foram fabricadas peças de parede simples e com ressaltados em regiões específicas. A primeira dessas peças tem uma forma semelhante à de um candelabro. Sua fabricação envolveu a utilização de todos os eixos disponíveis na célula robótica, incluindo o braço antropomórfico e a mesa rotativa. A Figura 150 ilustra algumas das etapas de fabricação desta peça. Inicialmente, foi construído um cilindro base e na sequência a mesa rotativa foi inclinada para atender o ângulo de  $10^\circ$  de inclinação dos próximos cilindros, estes cilindros subsequentes foram construídos com uma defasagem de  $120^\circ$  e seu ponto de origem posicionado de forma coincidente com o eixo do cilindro principal, conforme mostra a Figura 150A e B. Por fim, novos cilindros foram depositados sobre os cilindros anexos na posição horizontal, como mostra a Figura 150C.

Figura 150 – Algumas das Etapas de fabricação do cilindro com derivações (Candelabro).



Fonte: Autor.

A aparência superficial obtida nesta peça pode ser observada na Figura 151. A peça apresentou continuidade e isenção de defeitos superficiais.

Figura 151 – Resultado da fabricação do cilindro com derivações (Candelabro).



Fonte: Autor.

As medições realizadas desta peça apresentaram proximidade com os valores nominais para todos os segmentos, conforme mostra a Tabela 28.

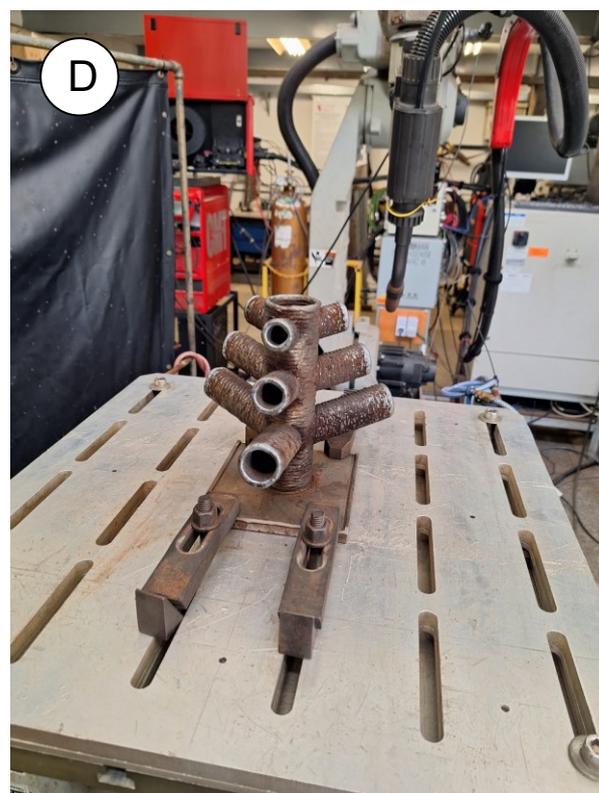
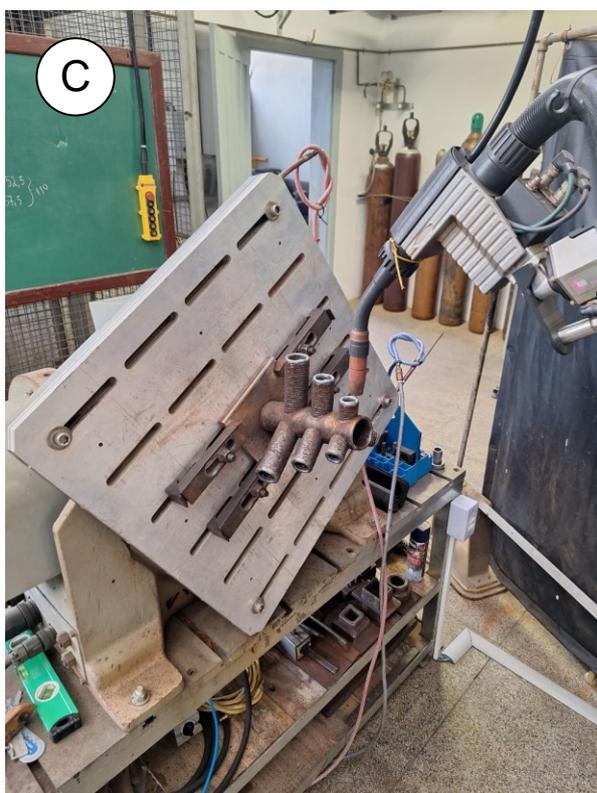
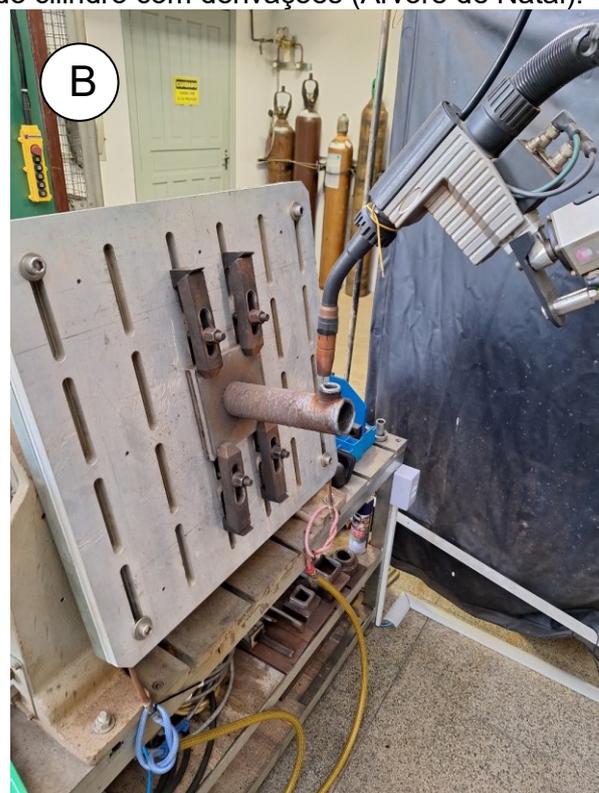
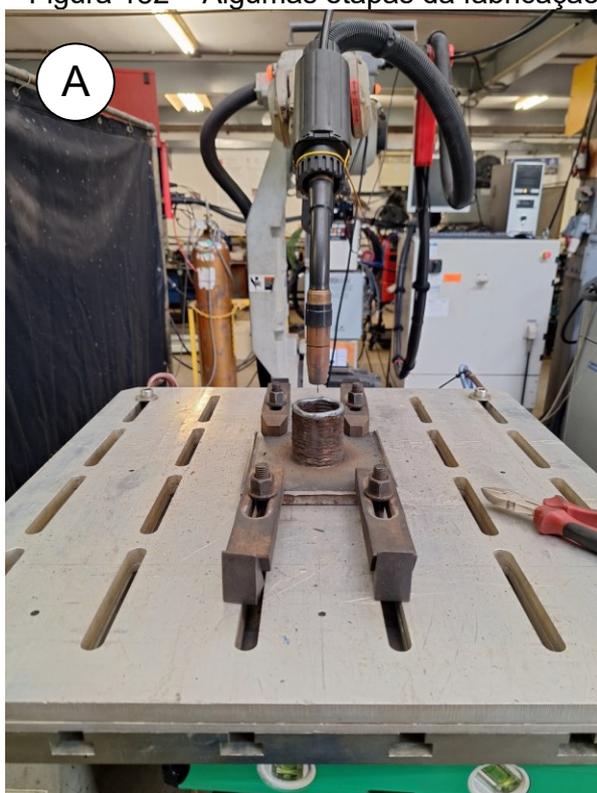
Tabela 28 – Medições da peça cilíndrica com derivações (Candelabro).

Característica	Segmento A			Segmento B			Segmento C		
	Nominal (mm)	Média (mm)	Desv. Pad (mm)	Nominal (mm)	Média (mm)	Desv. Pad (mm)	Nominal (mm)	Média (mm)	Desv. Pad (mm)
Diâmetro	85	86.7	0.4	45	45.8	0.5	35	35.9	0.3
Comprimento	195	196.8	0.3	100	101.2	0.4	60	62.1	0.3
Espessura da Parede	5	6.3	0.5	5	5.8	0.4	5	5.6	0.4

Fonte: Autor.

A segunda peça de parede simples tem uma forma composta por um cilindro base e ramificações cilíndricas de diferentes diâmetros, posicionadas em intervalos de 120° e inclinadas a um ângulo de 10°, como detalhado na metodologia. A Figura 152 ilustra algumas etapas da fabricação desta peça. Semelhante à peça anterior, o processo envolveu a fabricação de um cilindro base (Figura 152A), seguido pela produção das derivações utilizando a mesa posicionadora. Cada conjunto de ramificações foi fabricado rotacionando a peça, por meia da mesa posicionadora, em 120° para iniciar o próximo conjunto, conforme representado na Figura 152BC.

Figura 152 – Algumas etapas da fabricação do cilindro com derivações (Árvore de Natal).



Fonte: Autor.

O resultado da fabricação desta peça pode ser visualizado na Figura 153. A peça apresentou continuidade e isenção de defeitos superficiais.

Figura 153 – Resultado da fabricação do cilindro com derivações (Árvore de Natal).



Fonte: Autor.

A Tabela 29 apresenta os resultados das medições realizadas nos diferentes segmentos da peça. As medições indicaram conformidade com os valores nominais com baixo desvio.

Tabela 29 – Medições da peça cilíndrica com derivações (Árvore de Natal).

Característica	Segmento A			Segmento B		
	Nominal (mm)	Média (mm)	Desv. Pad. (mm)	Nominal (mm)	Média (mm)	Desv. Pad. (mm)
Diâmetro	50	53.4	0.6	40	41.1	0.5
Comprimento	200	202.1	0.3	90	91.5	0.5
Espessura da Parede	6	6.8	0.3	6	6.9	0.3
Característica	Segmento C			Segmento D		
	Nominal (mm)	Média (mm)	Desv. Pad. (mm)	Nominal (mm)	Média (mm)	Desv. Pad. (mm)
Diâmetro	35	36	0.4	30	30.6	0.5
Comprimento	60	60.9	0.4	30	30.5	0.4
Espessura da Parede	6	6.7	0.3	6	6.3	0.4

Fonte: Autor.

Outra peça com parede simples foi o logotipo do LABSOLDA. Neste caso, além da parede simples, foram exploradas paredes finas e combinações de geometrias, como semicírculos, curvas agudas e suaves, bem como proximidade de cordões. Contudo, foi possível identificar apenas um leve ressalto em um trecho da peça, resultado do acúmulo de material devido à baixa velocidade de deslocamento praticada nessa região, particularmente nas curvas de 180°. Essa redução de velocidade é oriunda de uma limitação do robô, que executa uma desaceleração para executar o movimento com baixa incerteza. É possível forçar o manipulador a manter a velocidade, porém isto pode acarretar um erro geométrico da trajetória. Sendo assim, visando maior assertividade na geometria da peça sacrificou-se a minimamente precisão da velocidade média de soldagem. Embora esse detalhe não tenha comprometido a integridade da peça, é digno de nota, pois ângulos excessivamente agudos não foram explorados neste estudo. A Figura 154 ilustra a aparência final da peça, a qual apresenta continuidade e ausência de defeitos, assim como as demais.

Figura 154 – Resultado da fabricação do logotipo do LABSOLDA.



Fonte: Autor.

As medições para esta peça estão detalhadas na Tabela 30. As medições evidenciaram uma proximidade com os valores nominais, acompanhadas de um desvio padrão relativamente baixo.

Tabela 30 – Medições da peça com forma baseada no logotipo do LABSOLDA.

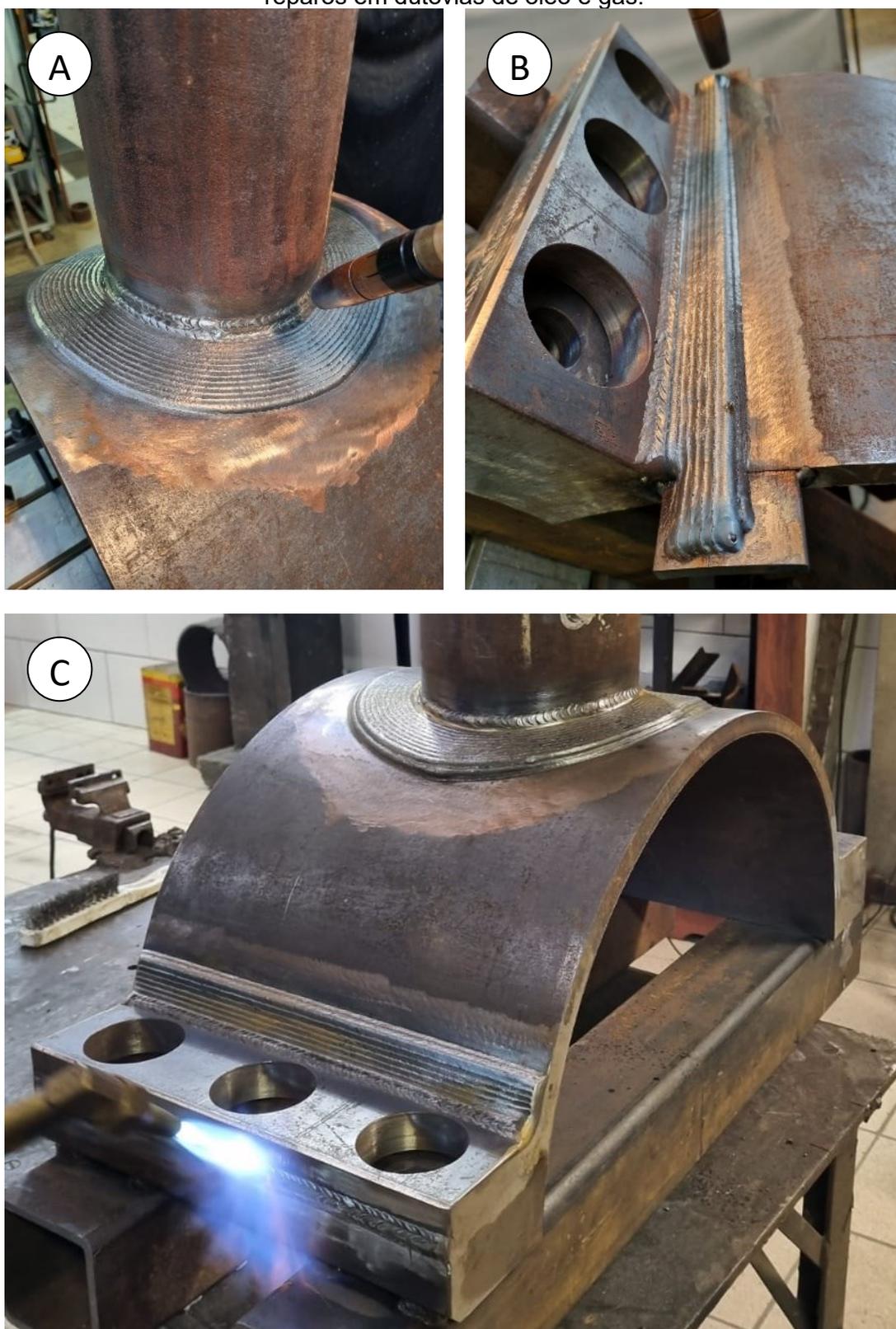
Característica	Nominal (mm)	Média (mm)	Desv. Pad. (mm)
Comprimento A	95	95.5	0.2
Comprimento B	105	105.4	0.3
Largura A	40	40.6	0.2
Largura B	50	50.3	0.2
Largura C	85	85.6	0.3
Altura	30	30.1	0.2
Espessura da Parede	4	4.2	0.2

Fonte: Autor.

Além da fabricação de peças integralmente por manufatura aditiva, foi realizado o reforço uma abraçadeira para reparos de dutos de óleo e gás, similar ao realizado por Zhong, et al. [122], que no mesmo contexto construíram anexos em um cilindro de aço inoxidável 316L. Conforme descrito na metodologia, o reforço por MA, foi realizado em regiões críticas, incluindo a região próxima ao capote e região do flange. Embora o projeto tenha inicialmente visado a redução da espessura para diminuir a massa, as cargas previstas nessas regiões demandaram um reforço localizado para compensar a redução de espessura nestas regiões. Isso foi feito mantendo a premissa de otimização estrutural e resistência mecânica. O resultado do reforço aplicado na abraçadeira pode ser visualizado na Figura 155.

A Figura 155A ilustra a etapa de deposição do colar em torno do capote, já a Figura 155B apresenta a etapa de deposição do reforço sobre o flange. Vale salientar que o reforço do flange foi realizado nos dois lados da abraçadeira.

Figura 155 – Resultado do processo de reforço por manufatura aditiva em abraçadeira para reparos em dutovias de óleo e gás.



Fonte: Autor.

As medições realizadas sobre a abraçadeira se concentraram no diâmetro da seção plana, largura e espessura dos reforços. Os resultados dessas medições estão detalhados na Tabela 31. Verificou-se que todas as medidas estavam dentro das tolerâncias definidas inicialmente, com um baixo desvio padrão.

Tabela 31 – Medições dos reforços realizados sobre a abraçadeira.

Característica	Segmento A			Segmento B		
	Nominal (mm)	Média (mm)	Desv. Pad. (mm)	Nominal (mm)	Média (mm)	Desv. Pad. (mm)
Diâmetro / Largura	278 ± 3	280.3	0.4	32	32.3	0.4
Espessura	Mín 5	6.4	0.3	Mín 5	6.3	0.3

Fonte: Autor.

Em síntese, o algoritmo de predição de diretrizes e parâmetros, demonstrou eficácia para a fabricação das peças de validação. Essas peças foram produzidas respeitando os valores nominais e as tolerâncias requeridas. O algoritmo se mostrou consistente e preciso, garantindo a integridade e a qualidade das peças fabricadas. Esses resultados validam a robustez e a confiabilidade do método proposto, destacando sua viabilidade para a fabricação de componentes com precisão e consistência.

## 6 CONCLUSÕES

Este trabalho, concebido em um ambiente multidisciplinar, teve como principal objetivo o desenvolvimento de um sistema integrado de manufatura aditiva focado no planejamento e parametrização do processo de soldagem orientado a relação CAD-to-part. Em vista das diversas frentes exploradas nesta tese, apresenta-se a seguir algumas conclusões específicas:

- O aumento concentração de CO<sub>2</sub> apresenta um efeito significativo sobre o perfil geométrico dos cordões depositados, aumentando sua largura, penetração, molhamento e reduzindo à altura. Além disso, o aumento da concentração de CO<sub>2</sub> tende a aumentar a tensão média do processo e com isso a potência, fomentando maiores temperaturas da poça, diâmetros de gota e em decorrência disso instabilidades;
- A utilização de argônio puro embora possível resulta em cordões extremamente convexos e com baixa penetração. Além disso, apresentam certa instabilidade em condição de maior potência;
- A mistura com 8% de CO<sub>2</sub> demonstrou um equilíbrio adequado entre estabilidade do processo e perfil geométrico sob a perspectiva da manufatura aditiva;
- O aumento da DBCP promove alterações no perfil de velocidade arame devido ao aumento do *stick-out* e com isso do consumo de arame, promovendo assim alterações tanto nas variáveis de soldagem como no perfil geométrico do cordão;
- A variação da velocidade de deslocamento à velocidade de alimentação constante promove alterações significativas no perfil geométrico. Em comparação com a variações lidas alterando a DBCP estas são mais significantes. Embora o controle de ambas seja crucial o da velocidade de deslocamento infere maiores alterações;
- A temperatura do substrato tem uma influência significativa sobre o perfil geométrico dos depósitos, que tende a aumentar a largura, o molhamento e reduzir a altura, portanto o controle de temperatura interpasse ou intercamada na manufatura aditiva é crucial. Nesse sentido, verificou-se que as alterações no perfil geométrico do cordão passam a ser significativas a partir de 200°C.

- A utilização de uma base refrigerada mostrou-se eficiente para as operações de manufatura aditiva, uma vez que além de auxiliar no resfriamento da peça em produção, promove um controle térmico dos equipamentos envolvidos como, por exemplo, a mesa rotativa;
- A utilização de um sensor infravermelho integrado ao robô, para controlar a temperatura intercamada mostrou-se eficiente e promissor para as operações de manufatura aditiva, aumentando a precisão do sistema;
- Verificou-se que na sobreposição vertical os cordões, na média, tendem a apresentar larguras levemente maiores e alturas levemente menores do que as do cordão base. Portanto, para correta definição do incremento vertical é necessário diminuir, na média, 10% da altura do cordão base, possibilitando menores variações da DBCP, ou realizar a correção de forma adaptativa para cada caso, assim como foi realizado neste trabalho;
- Para a sobreposição horizontal verificou-se que o modelo desenvolvido para sobreposição é eficiente e converge com demais modelos desenvolvidos na literatura, sendo que, para uma sobreposição adequada à distância entre centros de cordões deve ser igual a 67% da largura do cordão base;
- As intersecções entre cordões depositados mostram-se adequadas quando realizadas de forma contínua sem pausas no ponto de intersecção. Isso ocorre devido ao controle da fonte sobre a velocidade de alimentação em função da variação da DBCP, que ao ser reduzida devido ao obstáculo, reduz a velocidade de alimentação, reduzindo assim a quantidade de material na região de intersecção, favorecendo uma intersecção suave e sem significativos desvios.
- Para as conexões em caminhos fechados verificou-se que para manter a geométrica da peça estável deve-se alternar o ponto de início de cada nova camada. Evitando acúmulos e erros provenientes do início ou final do cordão. Além disso, a inversão de sentido a cada camada também parece ser interessante para redução de desvios ao longo da peça.

- Verificou-se que em caminhos fechados com cantos agudos, inferiores a  $30^\circ$  ocorrem acúmulos de material no vértice, que podem gerar distorções na peça. Contudo, não impedem a sua utilização se necessário.
- A utilização de tecimento da produção de peças mostrou-se possível. No entanto verificou-se uma menor tensão de escoamento e tensão máxima em comparação com a sobreposição contínua. Por outro lado, verificou-se um aumento da tenacidade.
- Em ambos os casos, sobreposição e tecimento, verificou-se isotropia do material, ou seja, independente da direção de teste o material tende a conservar suas propriedades.
- O algoritmo de predição de parâmetros mostrou-se eficaz, uma vez que a parametrização segmentada das peças é feita de maneira adaptativa baseada na base de dados e diretrizes pré-estabelecidas.
- O algoritmo mostrou-se eficaz não só para parametrização de peças, mas para revestimento e construção de anexos.

Esta tese representa mais um passo importante no desenvolvimento tecnológico e científico, devido às suas contribuições para a comunidade que estuda e aplica a manufatura aditiva, destacando-se o desenvolvimento de uma análise inédita e detalhada do sistema de soldagem GMAW com alimentação dinâmica CMT, que é o principal processo de WAAM atualmente. Além disso, este trabalho apresenta de forma sistemática metodologias direcionadas à fidelidade na relação CAD-to-part, por meio do desenvolvimento de estratégias de planejamento de trajetórias e diretrizes operacionais para a programação precisa da trajetória de deposição em consonância com o processo de deposição, visando a maximização da precisão entre o modelo digital e a peça final, reduzindo discrepâncias e aprimorando a qualidade dimensional e geométrica de peças e reparo de superfícies.

## 7 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho gerou bases e subsídio para a aplicação da manufatura aditiva no LABSOLDA, que continuará nessa linha de pesquisa aperfeiçoando e desenvolvendo essa tecnologia. Nesse sentido, algumas sugestões para trabalhos futuros são:

- Desenvolver uma interface gráfica para o algoritmo de predição de parâmetros para manufatura aditiva;
- Ampliar a base de dados para outras variantes do processo GMAW e outros materiais;
- Verificar a influência da posição de soldagem e a possibilidade de produção de peças em posição não convencionais como vertical, horizontal e sobre-cabeça;
- Analisar a microestrutura resultante das regiões de intersecção, conexão, sobreposição e tecimento. Além disso, submetê-las a testes de dureza e impacto.
- Desenvolver um sistema de refrigeração ativa baseado em ar comprimido ou submersão em água para redução da taxa de resfriamento das peças;

## 8 BIBLIOGRAFIA

1. Frazier, W.E. **Metal Additive Manufacturing: A Review**. *J Mater Eng Perform.* 23, 1917–1928 (2014). <https://doi.org/10.1007/s11665-014-0958-z>
2. Ali, Y., Henckell, P., Hildebrand, J., Reimann, J., Bergmann, J.P., Barnikol-Oettler, S. **Wire arc additive manufacturing of hot work tool steel with CMT process**. *J Mater Process Technol.* 269, 109–116 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.01.034>
3. Ding, D., Pan, Z., Cuiuri, D., Li, H. **Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests**, (2015)
4. Williams, S.W., Martina, F., Addison, A.C., Ding, J., Pardal, G., Colegrove, P. **Wire + Arc additive manufacturing**. *Materials Science and Technology (United Kingdom)*. 32, 641–647 (2016). <https://doi.org/10.1179/1743284715Y.0000000073>
5. Allen, J. *An Investigation into the Comparative Costs of Additive Manufacture vs. Machine from Solid for Aero Engine Parts.* , Derby (2006)
6. Ding, D., Pan, Z., Cuiuri, D., Li, H. **A practical path planning methodology for wire and arc additive manufacturing of thin-walled structures**. *Robot Comput Integr Manuf.* 34, 8–19 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2015.01.003>
7. Ding, D., Pan, Z., Cuiuri, D., Li, H., van Duin, S., Larkin, N. **Bead modelling and implementation of adaptive MAT path in wire and arc additive manufacturing**. *Robot Comput Integr Manuf.* 39, 32–42 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2015.12.004>
8. Wang, Z., Zimmer-Chevret, S., Léonard, F., Abba, G. **Prediction of bead geometry with consideration of interlayer temperature effect for CMT-based wire-arc additive manufacturing**. *Welding in the World.* 65, 2255–2266 (2021). <https://doi.org/10.1007/s40194-021-01192-2>
9. Posch, G., Chladil, K., Chladil, H. **Material properties of CMT—metal additive manufactured duplex stainless steel blade-like geometries**. *Welding in the World.* 61, 873–882 (2017). <https://doi.org/10.1007/s40194-017-0474-5>
10. Yang, Q., Xia, C., Deng, Y., Li, X., Wang, H. **Microstructure and mechanical properties of AlSi7Mg0.6 aluminum alloy fabricated by wire and arc**

- additive manufacturing based on cold metal transfer (WAAM-CMT).** *Materials*. 12, (2019). <https://doi.org/10.3390/ma12162525>
11. Furukawa, K. **New CMT arc welding process – welding of steel to aluminium dissimilar metals and welding of super-thin aluminium sheets.** *Welding International*. 20, 440–445 (2006). <https://doi.org/10.1533/wint.2006.3598>
  12. Mvola, B., Kah, P., Layus, P. **Review of current waveform control effects on weld geometry in gas metal arc welding process.** *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 96, 4243–4265 (2018). <https://doi.org/10.1007/s00170-018-1879-z>
  13. Mehnen, J., Ding, J., Lockett, H., Kazanas, P. **Design for Wire and Arc Additive Layer Manufacture.** In: *Global Product Development*. pp. 721–727. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg (2011)
  14. Ding, D., Pan, Z., Cuiuri, D., Li, H. **A multi-bead overlapping model for robotic wire and arc additive manufacturing (WAAM).** *Robot Comput Integr Manuf*. 31, 101–110 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2014.08.008>
  15. Ding, D., Pan, Z., Cuiuri, D., Li, H. **A tool-path generation strategy for wire and arc additive manufacturing.** *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 73, 173–183 (2014). <https://doi.org/10.1007/s00170-014-5808-5>
  16. Bai, X., Colegrove, P., Ding, J., Zhou, X., Diao, C., Bridgeman, P., roman Hönnige, J., Zhang, H., Williams, S. **Numerical analysis of heat transfer and fluid flow in multilayer deposition of PAW-based wire and arc additive manufacturing.** *Int J Heat Mass Transf*. 124, 504–516 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.03.085>
  17. Silva, R.H.G., Dutra, J.C., Gohr, R., Oliveira, M.A. **Controlled Short-Circuiting MIG/MAG Welding Process (CCC) Applied to the Root Pass in the Construction of Offshore Oil Pipelines-Process Analysis Tools.** In: *ISOPE*. p. 5 (2006)
  18. Wu, Y., Kovacevic, R. **Mechanically assisted droplet transfer process in gas metal arc welding.** *Proc Inst Mech Eng B J Eng Manuf*. 216, 555–564 (2002). <https://doi.org/10.1243/0954405021520247>
  19. Filho, H., Silva, R.H.G., Dutra, J.C. **Comparação do Processo MIG/MAG em Transferência por Curto-Circuito com Controle de Corrente (CCC) com o**

- Processo STT na Soldagem de Passes de Raiz em Dutos.** In: XXXVIII CONSOLDA. , Ouro Preto, MG (2012)
20. Kah, P., Suoranta, R., Martikainen, J. **Advanced gas metal arc welding processes.** The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 67, 655–674 (2013). <https://doi.org/10.1007/s00170-012-4513-5>
  21. Cunningham, C.R., Flynn, J.M., Shokrani, A., Dhokia, V., Newman, S.T. **Invited review article: Strategies and processes for high quality wire arc additive manufacturing.** Addit Manuf. 22, 672–686 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.06.020>
  22. Pickin, C.G., Williams, S.W., Lunt, M. **Characterisation of the cold metal transfer (CMT) process and its application for low dilution cladding.** J Mater Process Technol. 211, 496–502 (2011). <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.11.005>
  23. Bruckner, J.E.A. Current Welding Practice: CMT Technology. (2013)
  24. Marques, C. **Análise de Técnicas e Efeitos Físicos da Alimentação Dinâmica do Arame no Processo de Soldagem MIG/MAG com Vistas ao Desenvolvimento de um Sistema Flexível Nacional,** (2017)
  25. Galeazzi, D., Silva, R.H.G. e, Pigozzo, I.O., da Rosa, A.F., Pereira, A.S., Marques, C. **Analysis of current pulse during short-circuit phase in CMT version of GMAW process under a view of additive manufacturing.** Welding in the World. 66, 1369–1380 (2022). <https://doi.org/10.1007/s40194-022-01298-1>
  26. Sun, Z., Lv, Y., Xu, B., Liu, Y., Lin, J., Wang, K. **Investigation of droplet transfer behaviours in cold metal transfer (CMT) process on welding Ti-6Al-4V alloy.** The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 80, 2007–2014 (2015). <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7197-9>
  27. Galeazzi, D., Silva, R.H.G. e, Viviani, A.B., Jaeger, P.R., Schwedersky, M.B. **Evaluation of thermal and geometric properties of martensitic stainless steel thin walls built by additive manufacturing cold metal transfer (CMT) processes.** The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 120, 2151–2165 (2022). <https://doi.org/10.1007/s00170-022-08921-x>
  28. Dutra, J.C., Gonçalves e Silva, R.H., Marques, C. **Melting and welding power characteristics of MIG–CMT versus conventional MIG for aluminium 5183.**

- Welding International. 29, 181–186 (2015).  
<https://doi.org/10.1080/09507116.2014.932974>
29. Elrefaey, A. **Effectiveness of cold metal transfer process for welding 7075 aluminium alloys**. *Science and Technology of Welding and Joining*. 20, 280–285 (2015). <https://doi.org/10.1179/1362171815Y.0000000017>
  30. Grzybicki, M., Jakubowski, J. **Comparative tests of steel car body sheet welds made using CMT and MIG/MAG methods**. *Welding International*. 27, 610–615 (2013). <https://doi.org/10.1080/09507116.2011.606147>
  31. Ahsan, Md.R.U., Kim, Y.R., Kim, C.H., Kim, J.W., Ashiri, R., Park, Y.D. **Porosity formation mechanisms in cold metal transfer (CMT) gas metal arc welding (GMAW) of zinc coated steels**. *Science and Technology of Welding and Joining*. 21, 209–215 (2016). <https://doi.org/10.1179/1362171815Y.0000000084>
  32. Ahsan, Md.R.U., Kim, Y.R., Ashiri, R., Cho, Y.J., Eong, C.J., Park, Y.D. **Cold metal transfer (CMT) GMAW of zinc-coated steel**. *Weld J*. 95, 120–132 (2016)
  33. Luchtenberg, P., de Campos, P.T., Soares, P., Laurindo, C.A.H., Maranhão, O., Torres, R.D. **Effect of welding energy on the corrosion and tribological properties of duplex stainless steel weld overlay deposited by GMAW/CMT process**. *Surf Coat Technol*. 375, 688–693 (2019).  
<https://doi.org/10.1016/J.SURFCOAT.2019.07.072>
  34. Rozmus-Górnikowska, M., Cieniek, Ł., Blicharski, M., Kusiński, J. **Microstructure and Microsegregation of an Inconel 625 Weld Overlay Produced on Steel Pipes by the Cold Metal Transfer Technique**. *Archives of Metallurgy and Materials*. 59, 1081–1084 (2014). <https://doi.org/10.2478/amm-2014-0185>
  35. Evangeline, A., Sathiya, P. **Cold metal arc transfer (CMT) metal deposition of Inconel 625 superalloy on 316L austenitic stainless steel: microstructural evaluation, corrosion and wear resistance properties**. *Mater Res Express*. 6, 066516 (2019). <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab0a10>
  36. Benoit, A., Jobez, S., Paillard, P., Klosek, V., Baudin, T. **Study of Inconel 718 weldability using MIG CMT process**. *Science and Technology of Welding and Joining*. 16, 477–482 (2011). <https://doi.org/10.1179/1362171811Y.0000000031>

37. Ola, O.T., Doern, F.E. **A study of cold metal transfer clads in nickel-base INCONEL 718 superalloy.** Mater Des. 57, 51–59 (2014). <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.12.060>
38. Karim, M.A., Jadhav, S., Kannan, R., Pierce, D., Lee, Y., Nandwana, P., Kim, D.B. **Investigating stainless steel/aluminum bimetallic structures fabricated by cold metal transfer (CMT)-based wire-arc directed energy deposition.** Addit Manuf. 81, 104015 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.addma.2024.104015>
39. Cao R, Sun H, Chen H, Wang P. **Weldability of CMT Joining of AA6061-T6 to Boron Steels with Various Coatings.** Weld J. 93, 193S-204S (2014)
40. Cao, R., Yu, G., Chen, J.H., Wang, P.-C. **Cold metal transfer joining aluminum alloys-to-galvanized mild steel.** J Mater Process Technol. 213, 1753–1763 (2013). <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2013.04.004>
41. Derekar, K.S. **A review of wire arc additive manufacturing and advances in wire arc additive manufacturing of aluminium,** (2018)
42. Ralph Baker. **Method of making decorative articles,** (1925)
43. Harry K Shockey. **Machine for reclaiming worn brake drums,** (1930)
44. Akira Ujiie. **Method of and apparatus for constructing substantially circular cross section vessel by welding,** (1967)
45. Akira Ujiie. **Process and apparatus for tripple-electrode MIG welding using short-circuit and spray-arc deposition,** (1972)
46. Kussmaul K, Schoch F W, Luckow H. **High quality large components ‘shape welded’ by a SAW process.** Weld J. 62, 17–24 (1983)
47. Moraes M M, Krausser P, Echeverria J A. **A Fabricação, por soldagem, de bocais para componentes nucleares.** In: XII Encontro Nacional de Tecnologia de Soldagem. p. 15. , Campos do Jordão, SP (1986)
48. Huang, S.H., Liu, P., Mokasdar, A., Hou, L. **Additive manufacturing and its societal impact: A literature review,** (2013)
49. Wu, B., Pan, Z., Ding, D., Cuiuri, D., Li, H., Xu, J., Norrish, J. **A review of the wire arc additive manufacturing of metals: properties, defects and quality improvement.** J Manuf Process. 35, 127–139 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.08.001>

50. Opderbecke T, Guiheux S. **TOPTIG robotic welding process**. *Electr. Weld. Mach.* 3, 3 (2006)
51. IvánTabernero, Paskual, A., Álvarez, P., Suárez, A. **Study on Arc Welding Processes for High Deposition Rate Additive Manufacturing**. *Procedia CIRP.* 68, 358–362 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.12.095>
52. Wang, F., Williams, S., Colegrove, P., Antonysamy, A.A. **Microstructure and mechanical properties of wire and arc additive manufactured Ti-6Al-4V**. *Metall Mater Trans A Phys Metall Mater Sci.* 44, 968–977 (2013). <https://doi.org/10.1007/s11661-012-1444-6>
53. Lin, J.J., Lv, Y.H., Liu, Y.X., Xu, B.S., Sun, Z., Li, Z.G., Wu, Y.X. **Microstructural evolution and mechanical properties of Ti-6Al-4V wall deposited by pulsed plasma arc additive manufacturing**. *Mater Des.* 102, 30–40 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.04.018>
54. Cong, B., Ding, J., Williams, S. **Effect of arc mode in cold metal transfer process on porosity of additively manufactured Al-6.3%Cu alloy**. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology.* 76, 1593–1606 (2015). <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6346-x>
55. Derekar, K.S., Addison, A., Joshi, S.S., Zhang, X., Lawrence, J., Xu, L., Melton, G., Griffiths, D. **Effect of pulsed metal inert gas (pulsed-MIG) and cold metal transfer (CMT) techniques on hydrogen dissolution in wire arc additive manufacturing (WAAM) of aluminium**. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.* 107, 311–331 (2020). <https://doi.org/10.1007/s00170-020-04946-2>
56. Gomez Ortega, A., Corona Galvan, L., Deschaux-Beaume, F., Mezrag, B., Rouquette, S. **Effect of process parameters on the quality of aluminium alloy Al5Si deposits in wire and arc additive manufacturing using a cold metal transfer process**. *Science and Technology of Welding and Joining.* 23, 316–332 (2018). <https://doi.org/10.1080/13621718.2017.1388995>
57. Silva, R.H.G. e, Rocha, P.C.J., Rodrigues, M.B., Pereira, M., Galeazzi, D. **Analysis of Interlayer Idle Time as a Temperature Control Technique in Additive Manufacturing of Thick Walls by Means of CMT and CMT Pulse Welding Processes**. *Soldagem & Inspeção.* 25, (2020). <https://doi.org/10.1590/0104-9224/si25.01>

58. Andrade, D.G., Tankova, T., Zhu, C., Branco, R., da Silva, L.S., Rodrigues, D.M. **Mechanical properties of 3D printed CMT-WAAM 316 LSi stainless steel walls.** *J Constr Steel Res.* 215, 108527 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2024.108527>
59. Wang, C., Liu, T.G., Zhu, P., Lu, Y.H., Shoji, T. **Study on microstructure and tensile properties of 316L stainless steel fabricated by CMT wire and arc additive manufacturing.** *Materials Science and Engineering: A.* 796, 140006 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.140006>
60. Kazanas, P., Deherkar, P., Almeida, P., Lockett, H., Williams, S. **Fabrication of geometrical features using wire and arc additive manufacture.** *Proc Inst Mech Eng B J Eng Manuf.* 226, 1042–1051 (2012). <https://doi.org/10.1177/0954405412437126>
61. Tankova, T., Andrade, D., Branco, R., Zhu, C., Rodrigues, D., Simões da Silva, L. **Characterization of robotized CMT-WAAM carbon steel.** *J Constr Steel Res.* 199, 107624 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2022.107624>
62. Huang, C., Kyvelou, P., Zhang, R., Ben Britton, T., Gardner, L. **Mechanical testing and microstructural analysis of wire arc additively manufactured steels.** *Mater Des.* 216, 110544 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110544>
63. Ermakova, A., Mehmanparast, A., Ganguly, S., Razavi, N., Berto, F. **Investigation of mechanical and fracture properties of wire and arc additively manufactured low carbon steel components.** *Theoretical and Applied Fracture Mechanics.* 109, 102685 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2020.102685>
64. Nagasai, B.P., Malarvizhi, S., Balasubramanian, V. **Effect of welding processes on mechanical and metallurgical characteristics of carbon steel cylindrical components made by wire arc additive manufacturing (WAAM) technique.** *CIRP J Manuf Sci Technol.* 36, 100–116 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2021.11.005>
65. Silvestru, V.-A., Ariza, I., Vienne, J., Michel, L., Aguilar Sanchez, A.M., Angst, U., Rust, R., Gramazio, F., Kohler, M., Taras, A. **Performance under tensile loading of point-by-point wire and arc additively manufactured steel bars**

- for structural components.** Mater Des. 205, 109740 (2021).  
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.109740>
66. Yildiz, A.S., Davut, K., Koc, B., Yilmaz, O. **Wire arc additive manufacturing of high-strength low alloy steels: study of process parameters and their influence on the bead geometry and mechanical characteristics.** The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 108, 3391–3404 (2020). <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05482-9>
67. Gierth, M., Michael, N., Henckell, P., Reimann, J., Hildebrand, J., Bergmann, J.P. **Influence of the temperature–time regime on the mechanical properties during the DED-Arc process of near-net-shape Ti-6Al-4 V components.** Welding in the World. 67, 1643–1665 (2023).  
<https://doi.org/10.1007/s40194-023-01513-7>
68. Yangfan, W., Xizhang, C., Chuanchu, S. **Microstructure and mechanical properties of Inconel 625 fabricated by wire-arc additive manufacturing.** Surf Coat Technol. 374, 116–123 (2019).  
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.05.079>
69. ASTM International. ASTM 52900-21 Additive manufacturing — General principles — Fundamentals and vocabulary. ASTM International (2021)
70. Dehaghani, M.R., Tang, Y., Panicker, S., Wu, D., Coatanea, E., Wang, G.G. **Modeling and optimization of height-related geometrical parameters for thin wall structures manufactured by metal additive manufacturing.** The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 129, 4663–4675 (2023). <https://doi.org/10.1007/s00170-023-12618-0>
71. Suryakumar, S., Karunakaran, K.P., Bernard, A., Chandrasekhar, U., Raghavender, N., Sharma, D. **Weld bead modeling and process optimization in Hybrid Layered Manufacturing.** CAD Computer Aided Design. 43, 331–344 (2011). <https://doi.org/10.1016/j.cad.2011.01.006>
72. Xiong, J., Zhang, G., Gao, H., Wu, L. **Modeling of bead section profile and overlapping beads with experimental validation for robotic GMAW-based rapid manufacturing.** Robot Comput Integr Manuf. 29, 417–423 (2013).  
<https://doi.org/10.1016/j.rcim.2012.09.011>

73. Li, Y., Sun, Y., Han, Q., Zhang, G., Horváth, I. **Enhanced beads overlapping model for wire and arc additive manufacturing of multi-layer multi-bead metallic parts**. *J Mater Process Technol.* 252, 838–848 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.10.017>
74. Venturini, G., Montevecchi, F., Scippa, A., Campatelli, G. **Optimization of WAAM Deposition Patterns for T-crossing Features**. *Procedia CIRP.* 55, 95–100 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.08.043>
75. Sousa, B.M., Coelho, F.G.F., Júnior, G.M.M., de Oliveira, H.C.P., da Silva, N.N. **Thermal and microstructural analysis of intersections manufactured by wire arc additive manufacturing (WAAM)**. *Welding in the World.* (2024). <https://doi.org/10.1007/s40194-024-01735-3>
76. Leandro João da Silva, Ruham Pablo Reis, Américo Scotti. **The Potential of IR Pyrometry for Monitoring Interpass Temperature in Wire + Arc Additive Manufacturing**. *Evolutions in Mechanical Engineering.* 3, 1–5 (2019). <https://doi.org/10.31031/EME.2019.03.000553>
77. Rout, A., Deepak, B.B.V.L., Biswal, B.B. **Advances in weld seam tracking techniques for robotic welding: A review**. *Robot Comput Integr Manuf.* 56, 12–37 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2018.08.003>
78. Xiong, J., Zhang, G., Qiu, Z., Li, Y. **Vision-sensing and bead width control of a single-bead multi-layer part: Material and energy savings in GMAW-based rapid manufacturing**. *J Clean Prod.* 41, 82–88 (2013). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.10.009>
79. Xiong, J., Zhang, G. **Adaptive control of deposited height in GMAW-based layer additive manufacturing**. *J Mater Process Technol.* 214, 962–968 (2014). <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2013.11.014>
80. Gerdau. Certificado de Qualidade - ASTM A36. (2021)
81. Weld-Inox. WI M 76 - ER70S6 - Descrição do produto. (2022)
82. IMC. Manual do Usuário - SAP - V4 + V4Ti + V4CTi. (2014)
83. Specification Sheet - Model Y4-S2. IDT Vision. (2017)
84. Cavitar. Cavilux HF. (2022)
85. Canon. EF 180mm f/3.5L Macro USM.
86. Extender EF 2x III. Canon. (2021)

87. Lankin, Y.N. **Indicators of stability of the GMAW process**. The Paton Welding Journal. 1, 6–13 (2011)
88. Kumar, V., Albert, S.K., Chandrasekhar, N. **Signal processing approach on weld data for evaluation of arc welding electrodes using probability density distributions**. Measurement. 133, 23–32 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.09.076>
89. Kumar, V., Albert, S.K., Chandrasekhar, N., Jayapandian, J. **Evaluation of welding skill using probability density distributions and neural network analysis**. Measurement. 116, 114–121 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.11.009>
90. Kang, M.J., Rhee, S. **The statistical models for estimating the amount of spatter in the short circuit transfer mode of GMAW**. Weld J. 80, 1–8 (2001)
91. Suban, M., Tušek, J. **Dependence of melting rate in MIG/MAG welding on the type of shielding gas used**. J Mater Process Technol. 119, 185–192 (2001). [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(01\)00940-2](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(01)00940-2)
92. Roca, A.S., Fals, H.C., Fernández, J.B., Macías, E.J., Adán, F.S. **New stability index for short circuit transfer mode in GMAW process using acoustic emission signals**. Science and Technology of Welding and Joining. 12, 460–466 (2007). <https://doi.org/10.1179/174329307X213882>
93. Silva, R.H.G. e, Galeazzi, D., Rocha, P.C.J., Viviani, A.B., Bernardi, R.A. **Multiple output analysis for advanced waveform and controlled short-circuit MIG/MAG variants**. Welding in the World. 65, 2267–2282 (2021). <https://doi.org/10.1007/s40194-021-01176-2>
94. Arevalo, H.D.H., Vilarinho, L.O. **Desenvolvimento e avaliação de calorímetros por nitrogênio líquido e fluxo contínuo para medição de aporte térmico**. Soldagem & Inspeção. 17, 236–250 (2012). <https://doi.org/10.1590/S0104-92242012000300008>
95. Flir. Flir SC7000 Series. (2014)
96. Canon. Câmera EOS 60D. (2010)
97. Fancierstudio. VL576 LED Light Panel. (2016)
98. Douglas C. Montgomery, George C. Runger. Applied statistics and probability for engineers. , New York, NY (2023)

99. Silva, R.H.G. e, Rocha, P.C.J., Rodrigues, M.B., Pereira, M., Galeazzi, D. **Analysis of Interlayer Idle Time as a Temperature Control Technique in Additive Manufacturing of Thick Walls by Means of CMT and CMT Pulse Welding Processes.** Soldagem & Inspeção. 25, (2020). <https://doi.org/10.1590/0104-9224/si25.01>
100. Mecalor. Manual do Usuário MiniChiller MCA. (2021)
101. Flir. HD Handheld Thermal Imaging Camera - T1030SC. (2018)
102. Omega. USB Infrared Temperature Sensor for Benchtop, Laboratory and Education. (2017)
103. Arduino. Arduino UNO R3 - Product Reference Manual. (2022)
104. Ningbo Floiroshing Precision Electron. FL-3FF PC Board Relay. (2012)
105. Xiong, J., Zhang, G., Hu, J., Wu, L. **Bead geometry prediction for robotic GMAW-based rapid manufacturing through a neural network and a second-order regression analysis.** J Intell Manuf. 25, 157–163 (2014). <https://doi.org/10.1007/s10845-012-0682-1>
106. Waygate Technologies. ERESKO 65 MF4. (2020)
107. CarestreamNDT. INDUSTREX HPX-1 Plus. (2020)
108. Hertel, M., Trautmann, M., Jäckel, S., Füssel, U. **The Role of Metal Vapour in Gas Metal Arc Welding and Methods of Combined Experimental and Numerical Process Analysis.** Plasma Chemistry and Plasma Processing. 37, 531–547 (2017). <https://doi.org/10.1007/s11090-017-9790-1>
109. Kah, P., Martikainen, J. **Influence of shielding gases in the welding of metals.** International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 64, 1411–1421 (2013). <https://doi.org/10.1007/s00170-012-4111-6>
110. Marques, C., Pereira, A.S., Silva, R.H.G., Galeazzi, D., Pigozzo, I.O. **Analysis of the solid wire dip in the GMAW-CMT melting pool as a means for enhancing additive manufacturing.** Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. 45, 129 (2023). <https://doi.org/10.1007/s40430-023-04054-8>
111. Carpenter, K.R., Monaghan, B.J., Norrish, J. **Influence of shielding gas on fume formation rate for gas metal arc welding (GMAW) of plain carbon steel.** In: ASM Proceedings of the International Conference: Trends in Welding Research. pp. 436–442 (2009)

112. Silva, R.H.G. **Soldagem MIG/MAG em Transferência Metálica Por Curto-Circuito Controlado Aplicada ao Passe De Raiz**, (2005)
113. Scotti, A., Ponomarev, V. Soldagem MIG/MAG melhor entendimento melhor desempenho. Artliber, São Paulo (2014)
114. Lesnewich, A. **Control of Melting Rate and Metal Transfer. Parts I & II**. Weld J. 343/353-418/425 (1958)
115. Modenesi, P.J., Starling, C.M.D., Reis, R.I. **Wire melting phenomena in gas metal arc welding**. Science and Technology of Welding and Joining. 10, 610–616 (2005). <https://doi.org/10.1179/174329305X57446>
116. Allum, C.J., Quintino, M.L. **Pulsed GMAW, Interactions and Process Parameters - Parts 1 & 2**. Weld. & Metal Fabrication. 3/4, 86/89-126/129 (1984)
117. Cuiuri, D. **Control of the short-circuit gas metal arc welding process using instantaneous current regulation** Recommended Citation, <http://ro.uow.edu.au/theses/1944>, (2000)
118. Kodama, S., Furusako, S., Yasunobu, M., Ishida, Y., Saito, M., Nose, T. **Arc Welding Technology for Automotive Steel Sheets**. NIPPON STEEL TECHNICAL REPORT. 7, 83–90 (2013)
119. Zhang, Y., Chen, Y., Li, P., Male, A.T. **Weld deposition-based rapid prototyping: a preliminary study**. J Mater Process Technol. 135, 347–357 (2003). [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)00867-1](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00867-1)
120. Akula, S., Karunakaran, K.P. **Hybrid adaptive layer manufacturing: An Intelligent art of direct metal rapid tooling process**. Robot Comput Integr Manuf. 22, 113–123 (2006). <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2005.02.006>
121. Yildiz, A.S., Davut, K., Koc, B., Yilmaz, O. **Wire arc additive manufacturing of high-strength low alloy steels: study of process parameters and their influence on the bead geometry and mechanical characteristics**. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 108, 3391–3404 (2020). <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05482-9>
122. Zhong, Y., Zheng, Z., Li, J., Wang, C. **Fabrication of 316L nuclear nozzles on the main pipeline with large curvature by CMT wire arc additive manufacturing and self-developed slicing algorithm**. Materials Science and Engineering: A. 820, 141539 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.141539>

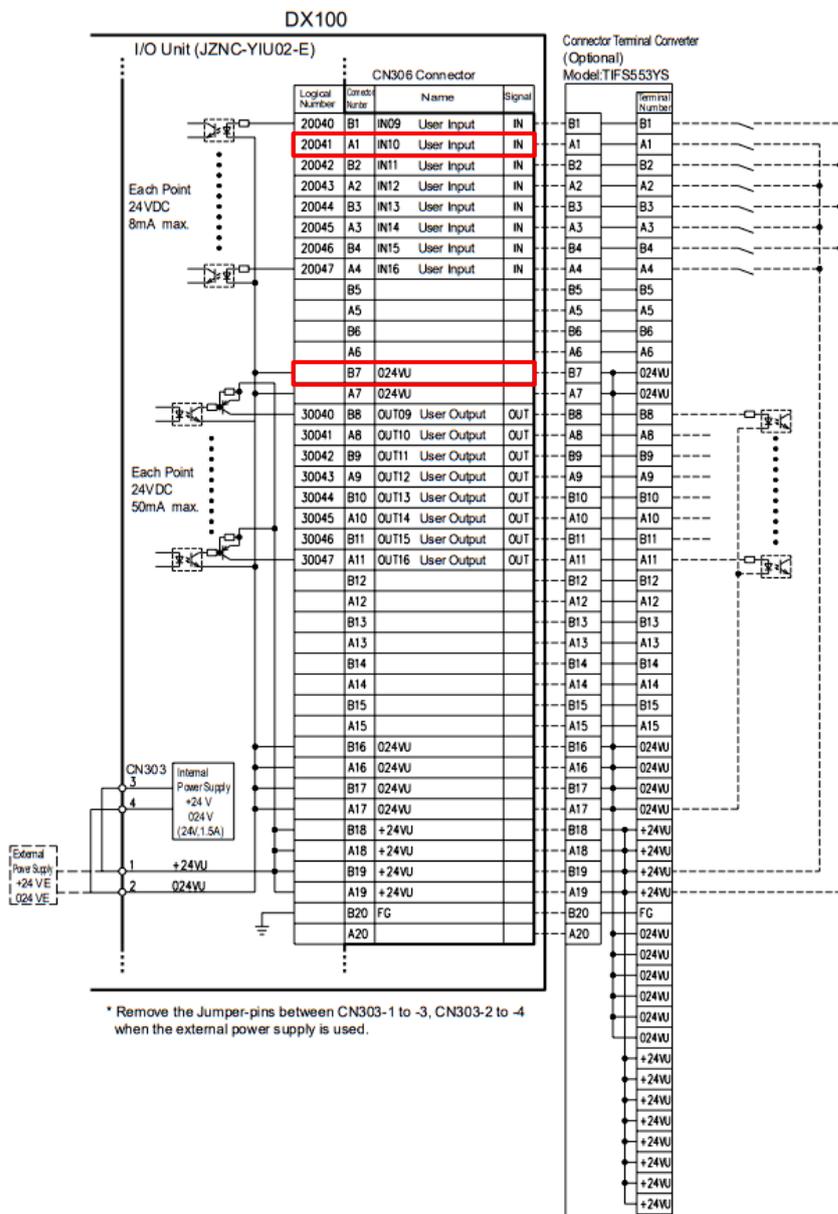


## ANEXO A – CONEXÕES I/O DO CONTROLADOR DX100

168533-1CD

Standard I/O Signal Assignment (PNP) 1 Arc Welding

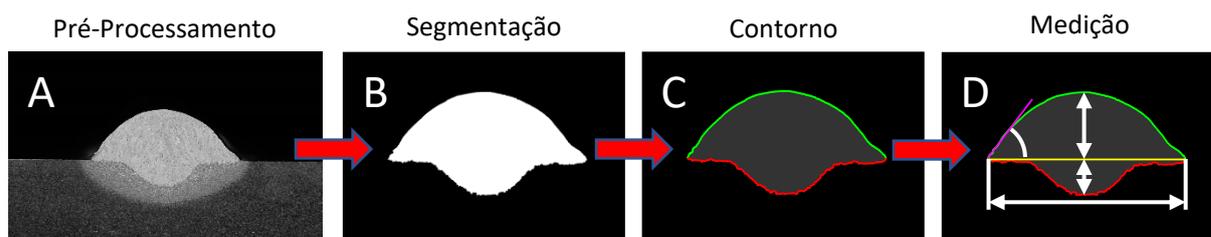
Fig. 1-3: JZNC-YIU02-E (CN306 Connector) I/O Allocation and Connection Diagram (For Arc Welding)



## APÊNDICE A – ALGORITMO DE MEDIÇÃO PARA MACROGRAFIAS

Devido ao elevado volume de amostras macrográficas geradas ao longo do presente trabalho projetou-se um algoritmo de caracterização geométrica de macrografias baseando-se em análise de imagem. O fluxograma presente na Figura 156 ilustra o funcionamento geral do algoritmo desenvolvido.

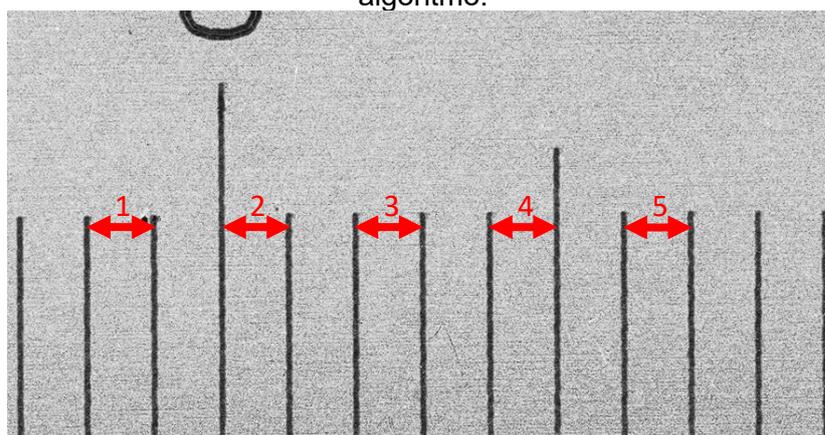
Figura 156 – Fluxograma do algoritmo de medição de macros.



Fonte: Autor.

Previamente a etapa de pré-processamento a imagem é referenciada por meio da calibração da escala. Para isto, durante a aquisição das imagens foi aquisitado uma imagem com uma referência métrica conhecida, neste caso, foi utilizando um paquímetro. A Figura 157 ilustra a escala utilizada como referência para a definição da escala. O método utilizado para definição da escala foi medir 1 mm do paquímetro em cinco regiões distintas e utilizar a média desses valores de pixel/mm.

Figura 157 – Método utilizada para definição da escala utilizada como referência para o algoritmo.



Fonte: Autor.

Para a etapa A de pré-processamento inicialmente a imagem foi convertida de RGB para escala de cinza. Na etapa de segmentação localizou-se a região central do cordão de solda da macro e calculou-se a média da intensidade de 50 pixels, a média resultante foi chamada de intensidade média dos pixels, a partir deste valor

aplicou-se um desvio condicional que varreu a imagem e alterou os valores da intensidade do pixel para 1 para valores maiores que a média e 0 para valores menores que a média, com isto, ao fim, se tem uma imagem binarizada, representada pelo trecho B da Figura 156.

A próxima etapa consistiu em extrair o contorno da região de interesse, ou seja, do cordão de solda. O método utilizado consistiu em varrer a imagem binarizada verticalmente em ambos os sentidos até a localização de um pixel com valor igual a 1, ao encontrar o pixel o algoritmo identifica sua posição na imagem, armazena a coordenada XY em uma matriz e se dirige a próxima coluna. Como o algoritmo varre a imagem em ambos os sentidos verticais, ascendente e descendente, são criadas duas matrizes com as coordenadas dos pontos, uma para a parcela inferior do perfil e outra para a parcela superior.

A partir do contorno foi possível extrair as informações de largura, altura, penetração, ângulo de molhamento e diluição da macrografia. Previamente as medições das características geométricas de interesse foi necessário identificar a inclinação da chapa na qual o cordão foi depositado, para mitigar errôneos cálculos de ângulo de molhamento bem como altura e penetração. Para isto, por meio de interpolação linear entre a intersecção da parcela superior e inferior do cordão foi calculada a reta que representa a chapa bem como sua inclinação.

Para cada uma das características geométricas foi aplicado um método distinto. Para a largura do cordão o método utilizado consistiu em identificar o ponto de intersecção entre as curvas superior e inferior, definindo assim o intervalo [a, b]. A partir deste intervalo, utilizando a equação (28), foi calculada a distância entre os pontos, a qual se traduz na largura do cordão.

$$L = \sqrt{(x_b - x_a)^2 + (y_b - y_a)^2} \quad (28)$$

Onde:

L = Largura

X<sub>a</sub> = Coordenada x do intervalo a;

X<sub>b</sub> = Coordenada x do intervalo b;

Y<sub>a</sub> = Coordenada Y do intervalo a;

Y<sub>b</sub> = Coordenada Y do intervalo b;

A altura foi definida através da distância entre a reta geral da chapa e ponto mais externo da curva superior de modo que a distância entre os pontos seja uma projeção ortogonal da reta da chapa. Para a penetração, o modelo foi o mesmo, porém utilizando a matriz com a parcela inferior do cordão de solda. Para o cálculo tanto da altura como da penetração foi utilizada a equação (29), que expressa a distância de um ponto a uma reta. Esta equação foi aplicada em um laço de repetição ao longo das curvas para identificar até a identificação da maior distância.

$$A = \frac{|a \cdot x + b \cdot y + c|}{\sqrt{a^2 + b^2}} \quad (29)$$

Onde:

A = Altura do cordão;

a = coeficiente x da reta da chapa;

b = coeficiente y da reta da chapa;

c = constante da reta da chapa;

x = coordenada x do ponto da curva;

y = coordenada y do ponto da curva;

Para o ângulo de molhamento a estratégia utilizada concentrou-se em interpolar uma reta tangente ao ponto intersecção da parcela superior e inferior do cordão e um ponto 'n' da matriz de coordenadas da parcela superior. A partir desta reta calculou-se o ângulo entre a reta tangente aos pontos e a reta da chapa, que é dada pela equação (30). Este método foi aplicado em ambos os flancos do cordão e o ângulo de molhamento resultante foi a média das duas medições.

$$A_m = \tan^{-1} \left| \frac{m_{am} - m_c}{1 + m_{am} \cdot m_c} \right| \quad (30)$$

Onde:

$A_m$  = ângulo de molhamento.

$m_{am}$  = coeficiente angular da reta tangente a parcela superior;

$m_c$  = coeficiente angular da reta que representa a chapa;

Além disto, calculou-se a diluição do cordão. Para isto, a área tanto da parcela superior com da parcela inferior foi calculada através de cálculo integral. A área superior é dada pela equação (31) e a área inferior é dada pela equação (32). A área superior é expressa pela diferença entre a área abaixo da curva da parcela superior e a área abaixo da curva que representa a chapa no intervalo  $[a, b]$ , que representa os pontos de intersecção das curvas superior e inferior do cordão. Do mesmo modo para a área inferior o cálculo consistiu na diferença entre a área abaixo a curva que representa a chapa e a área abaixo da curva da parcela inferior do cordão no intervalo  $[a, b]$ .

$$A_{sup} = \int_a^b f(x) - g(x) dx \quad (31)$$

$$A_{inf} = \int_a^b g(x) - h(x) dx \quad (32)$$

Onde:

$A_{sup}$  = Area superior;

$A_{inf}$  = Area inferior;

$f(x)$  = Função que representa a parcela superior do cordão;

$g(x)$  = Função que representa a reta da chapa;

$h(x)$  = Função que representa a parcela inferior do cordão;

$a$  = Ponto de intersecção entre a parcela inferior e superior (início);

$b$  = Ponto de intersecção entre a parcela inferior e superior (fim).

Para o cálculo da diluição utilizou-se a equação (33) que representa a razão entre a área inferior sobre a área total, ou seja, a soma da área superior e inferior.

$$D = \frac{A_{inf}}{A_{sup} + A_{inf}} \times 100 \quad (33)$$

Por fim, a saída do algoritmo com base na imagem de entrada é uma tabela com as características geométricas de largura, altura, penetração, ângulo de molhamento e diluição.

A incerteza associada ao algoritmo foi definida usando da largura e altura como referência. Sendo assim, selecionou-se aleatoriamente três amostras macrográficas e utilizando um paquímetro Mitutoyo digital com resolução de 0,01 mm mediu-se cinco vezes cada uma destas características e calculou-se a média e a desvio padrão associado para cada um dos mensurandos. Conhecendo a medidas dos mensurandos foi possível calcular a tendência do algoritmo e assim prover uma correção.

As medições realizadas para as amostras estão presentes na Tabela 32. Nas medições realizadas verificou-se uma tendência média de -0,02 mm para a largura e 0,01 mm para a altura. Sendo assim, a correção aplicada na altura foi 0,02 mm e -0,01 mm para a largura, respectivamente.

Tabela 32 – Medições realizadas para calibração do algoritmo

	Amostra 1		Amostra 2		Amostra 3	
	Largura	Altura	Largura	Altura	Largura	Altura
Média	6,33	2,16	6,98	3,36	6,71	2,57
Desvio Padrão	0,04	0,02	0,03	0,01	0,02	0,03
Algoritmo	6,30	2,18	6,99	3,36	6,72	2,56
Tendência	-0,03	0,02	-0,01	0,00	0,01	-0,01

## APÊNDICE B – FLUXOGRAMA DETALHADO DA METODOLOGIA DE PROGRAMAÇÃO DA TRAJETÓRIA DOS REFORÇOS POR MANUFATURA ADITIVA NA ABRAÇADEIRA

