

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO

Matheus de Paula Castro

Avaliação do diâmetro do arame e trajetória
de fabricação de aerofólios de alumínio por
Manufatura Aditiva por Deposição à Arco

Goiânia

2025



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE GRADUAÇÃO NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio do Repositório Institucional (RI/UFG), regulamentado pela Resolução CEPEC no 1240/2014, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei no 9.610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo dos Trabalhos de Conclusão dos Cursos de Graduação disponibilizado no RI/UFG é de responsabilidade exclusiva dos autores. Ao encaminhar(em) o produto final, o(s) autor(a)(es)(as) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

1. Identificação do Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação (TCCG)

Nome(s) completo(s) do(a)(s) autor(a)(es)(as): Matheus de Paula Castro

Título do trabalho: Avaliação do diâmetro do arame e trajetória de fabricação de aerofólios de alumínio por Manufatura Aditiva por Deposição a Arco

2. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador) Concorda com a liberação total do documento [X] SIM [] NÃO¹

[1] Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante: a) consulta ao(à)(s) autor(a)(es)(as) e ao(à) orientador(a); b) novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo do TCCG. O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro.

Obs.: Este termo deve ser assinado no SEI pelo orientador e pelo autor.



Documento assinado eletronicamente por **Demostenes Ferreira Filho, Professor do Magistério Superior**, em 12/08/2026, às 09:04, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Daniel Souza, Professor(a) do Magistério Superior**, em 12/08/2026, às 11:17, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Matheus De Paula Castro, Discente**, em 12/08/2026, às 12:00, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **6421509** e o código CRC **5B8FD4B9**.

Referência: Processo nº 23070.043374/2025-58

SEI nº 6421509

Matheus de Paula Castro

**Avaliação do diâmetro do arame e trajetória de
fabricação de aerofólios de alumínio por Manufatura
Aditiva por Deposição à Arco**

Projeto Final de Curso apresentado como
parte dos requisitos para a obtenção do tí-
tulo de Bacharel em Engenharia Mecânica,
pela Escola de Engenharia Elétrica, Mecâ-
nica e de Computação da Universidade Fe-
deral de Goiás.

Universidade Federal de Goiás – UFG
Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação
Graduação em Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Dr. Demostenes Ferreira Filho
Coorientador: Prof. Dr. Daniel Souza

Goiânia
2025

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do
Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Castro, Matheus de Paula

Avaliação do diâmetro do arame e trajetória de fabricação de aerofólios
de alumínio por Manufatura Aditiva por Deposição à Arco [manuscrito] /
Matheus de Paula Castro. - 2025.

62 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Demostenes Ferreira Filho; co-orientador Dr.
Daniel Souza.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade
Federal de Goiás, Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de
Computação (EMC), Engenharia Mecânica, Goiânia, 2025.

Bibliografia. Apêndice.

Inclui siglas, fotografias, abreviaturas, símbolos, tabelas,
algoritmos, lista de figuras, lista de tabelas.

1. MADA/WAAM. 2. Alumínio 4043. 3. Diâmetro de arame. 4.
Trajetória robotizada. 5. Aerofólio NACA 4-dígitos. I. Ferreira Filho,
Demostenes, orient. II. Título.

CDU 621



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Aos dez dias do mês de dezembro do ano de 2025 iniciou-se a sessão pública de defesa do Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) intitulado “Avaliação do diâmetro do arame e trajetória de fabricação de aerofólios de alumínio por Manufatura Aditiva por Deposição a Arco”, de autoria de Matheus de Paula Castro, do curso de Engenharia Mecânica, da Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC) da UFG. Os trabalhos foram instalados pelo Prof. Demostenes Ferreira Filho - orientador (EMC/UFG) com a participação dos demais membros da Banca Examinadora: Maria Helena Rodrigues Moreno - (PPGMEC/UFG), Prof. Kléber Mendes de Figueiredo (EMC/UFG) e Prof. Daniel Souza - coorientador (EMC/UFG). Após a apresentação, a banca examinadora realizou a arguição do estudante. Posteriormente, de forma reservada, a Banca Examinadora atribuiu a nota final de 9,2 (nove vírgula dois), tendo sido o TCC considerado APROVADO.

Proclamados os resultados, os trabalhos foram encerrados e, para constar, lavrou-se a presente ata que segue assinada pelos Membros da Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Demostenes Ferreira Filho, Professor do Magistério Superior**, em 10/12/2025, às 15:28, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Daniel Souza, Professor do Magistério Superior**, em 10/12/2025, às 15:29, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Kleber Mendes De Figueiredo, Professor do Magistério Superior**, em 10/12/2025, às 15:30, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Maria Helena Rodrigues Moreno, Discente**, em 10/12/2025, às 15:32, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **5848860** e o código CRC **CC519CD3**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela força, pela saúde e pela oportunidade de chegar até aqui, mesmo diante dos desafios que se apresentaram ao longo da caminhada.

À memória do meu pai, que partiu antes da conclusão desta etapa, mas cuja presença permanece viva em cada conquista e em cada esforço que dedico à construção da minha trajetória. Suas palavras, seu exemplo e sua coragem continuam sendo fonte de inspiração diária.

À minha mãe, pelo amor incondicional, pela dedicação incansável e por todo o apoio que sempre ofereceu. Nada disso teria sido possível sem sua presença firme e carinhosa.

Aos meus amigos e família, que me acompanharam nos momentos de alegria e também nos períodos de incerteza, oferecendo apoio, compreensão e incentivo para seguir adiante.

Expresso minha gratidão à Universidade Federal de Goiás (UFG), instituição que me acolheu e me proporcionou formação acadêmica de excelência, além de experiências que levarei para toda a vida.

Agradeço aos professores do curso de Engenharia Mecânica, que contribuíram para minha formação não apenas com conhecimento técnico, mas também com ética, rigor e senso crítico.

Meu profundo agradecimento ao meu orientador, Prof. Dr. Demostenes Ferreira Filho, pela confiança, pela compreensão e paciência, pela orientação dedicada e por compartilhar seu conhecimento de forma sempre generosa. Ao meu coorientador, Prof. Dr. Daniel Souza, pela disponibilidade, pelas contribuições essenciais e pela atenção aos detalhes que enriqueceram este trabalho.

Aos técnicos e profissionais que atuam nos laboratórios, agradeço pelo suporte e pela colaboração indispensável para a realização desta pesquisa. Em especial, ao técnico Fleide, que me acompanhou por inúmeras horas na realização dos ensaios, meu muito obrigado.

RESUMO

A Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA) tem se destacado como alternativa viável para a produção de componentes metálicos de grande porte, oferecendo elevada taxa de deposição, flexibilidade geométrica e menor custo operacional quando comparada a outros processos de manufatura aditiva metálica. Entretanto, a aplicação dessa técnica em ligas de alumínio apresenta desafios relacionados à alta condutividade térmica, rápida formação de óxidos e instabilidades no arco elétrico. Este trabalho teve como objetivo avaliar a influência do diâmetro do arame e da estratégia de trajetória na fabricação de protótipos de aerofólios de alumínio ER4043 por MADA, investigando parâmetros de soldagem, estabilidade da deposição e qualidade geométrica dos perfis obtidos. Foram avaliados arames de 1,2 mm, 1,0 mm e 0,8 mm, por meio da fabricação de paredes multicamadas e análises qualitativas de continuidade, regularidade e comportamento térmico. Em seguida, foram desenvolvidas e testadas estratégias de trajetória aplicadas ao perfil NACA 2412, com segmentação do contorno e ajuste local da velocidade de deslocamento do robô. Os resultados indicaram que o arame de 1,2 mm apresentou o melhor desempenho, permitindo deposições estáveis e reproduzíveis, enquanto o arame de 0,8 mm mostrou-se inviável nas condições avaliadas. A análise das trajetórias demonstrou que a variação controlada da velocidade de deposição é essencial para compensar a diferença de curvatura ao longo do aerofólio, resultando em maior uniformidade geométrica. O protótipo final, fabricado com corda ampliada, apresentou boa adesão entre camadas e contorno compatível com o modelo teórico. Conclui-se que a escolha do diâmetro do arame e a definição adequada da trajetória são fatores determinantes para a qualidade de peças em alumínio produzidas por MADA, contribuindo para o avanço da técnica em aplicações aeronáuticas e industriais.

Palavras-chave: MADA/WAAM. Alumínio 4043. Diâmetro de arame. Trajetória robotizada. Aerofólio NACA 4-dígitos.

ABSTRACT

Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) has emerged as a promising alternative for producing large metallic components, offering high deposition rates, geometric flexibility, and reduced operational costs when compared to other metal additive manufacturing processes. However, the use of WAAM with aluminum alloys poses significant challenges due to the material's high thermal conductivity, rapid oxide formation, and susceptibility to arc instability. This study aimed to evaluate the influence of wire diameter and deposition trajectory on the fabrication of ER4043 aluminum airfoils prototypes using WAAM, examining welding parameters, arc behavior, and geometric accuracy. Aluminum wires with diameters of 1.2 mm, 1.0 mm, and 0.8 mm were tested through multilayer wall fabrication and qualitative analyses of continuity, stability, and thermal behavior. Subsequently, different trajectory strategies were developed and applied to a NACA 2412 airfoil, including contour segmentation and local adjustment of robotic travel speed. The results showed that the 1.2 mm wire provided the most stable and reproducible deposition conditions, whereas the 0.8 mm wire proved unfeasible under the tested parameters. Trajectory optimization revealed that controlled variation of travel speed is essential to compensate for geometric curvature differences along the airfoil, resulting in improved dimensional uniformity. The final enlarged prototype exhibited good layer adhesion and a contour consistent with the theoretical model. Overall, the findings demonstrate that wire diameter selection and trajectory definition play a decisive role in the quality of aluminum components produced by WAAM, supporting the advancement of this technique for aerospace and industrial applications.

Keywords: WAAM. Aluminum 4043. Wire diameter. Robotic trajectory. NACA 4-digit airfoil.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Representação esquemática do processo MADA	20
Figura 2 – Estação de trabalho com manipulador robótico Yaskawa Motoman HP20D	28
Figura 3 – Estação de trabalho modelada no software RoboDK	30
Figura 4 – Parede fabricada com arame 1,2 mm em modo pulsado sinérgico .	37
Figura 5 – Parede fabricada na primeira tentativa com arame 1,2 mm em modo curto-circuito	39
Figura 6 – Parede fabricada na segunda tentativa com arame 1,2 mm em modo curto-circuito	40
Figura 7 – Parede fabricada na terceira tentativa com arame 1,2 mm em modo curto-circuito	41
Figura 8 – Paredes fabricadas na primeira, segunda e terceira tentativa com aramé 1,0 mm	43
Figura 9 – Paredes fabricadas na quarta e quinta tentativa com arame 1,0 mm	44
Figura 10 – Parede fabricada com configuração 64 A a-70 para arame 0,8 mm .	47
Figura 11 – Paredes fabricadas com diferentes configurações para arame 0,8 mm	47
Figura 12 – Parede fabricada em modo pulsado convencional para arame 0,8 mm	49
Figura 13 – Segmentação do perfil NACA 2412 em 10 pontos para definição das V_{des}	50
Figura 14 – Perfil fabricado na primeira tentativa para otimização de trajetória . .	51
Figura 15 – Perfil fabricado na segunda tentativa para otimização de trajetória .	52
Figura 16 – Perfil fabricado na terceira tentativa para otimização de trajetória . .	52
Figura 17 – Perfis fabricados na quarta, quinta e sexta tentativas para otimização de trajetória	53
Figura 18 – Modelo final de aerofólio fabricado	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resumo dos métodos de manufatura aditiva	19
Tabela 2 – Parâmetros para tentativa com arame 1,2 mm em modo pulsado sinérgico	37
Tabela 3 – Médias de corrente e tensão por intervalos de passes para arame 1,2 mm em modo pulsado sinérgico	38
Tabela 4 – Parâmetros para tentativas com arame 1,2 mm em modo curto-circuito	41
Tabela 5 – Médias de corrente e tensão por intervalos de passes para arame 1,2 mm em modo curto-circuito	42
Tabela 6 – Parâmetros para tentativas com arame 1,0 mm em modo pulsado sinérgico	45
Tabela 7 – Médias de corrente e tensão por intervalos de passes para arame 1,0 mm	45
Tabela 8 – Parâmetros para tentativas com arame 0,8 mm em modo pulsado sinérgico	48
Tabela 9 – Parâmetros para tentativas com arame 0,8 mm em modo pulsado convencional	49
Tabela 10 – Parâmetros para construção dos perfis de aerofólio	51
Tabela 11 – V_{des} (cm/min) em cada ponto da trajetória para cada tentativa	54

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAD	Computer-Aided Design
CAM	Computer-Aided Manufacturing
CC	Constant Current
CMT	Cold Metal Transfer
CTI	Controle de Temperatura Intercamada
CV	Constant Voltage
DBCP	Distância entre o Bico de Contato e a Peça
DED	Directed Energy Deposition
FDM	Fused Deposition Modelling
GMAW	Gas Metal Arc Welding
LOM	Laminated Object Manufacturing
MA	Manufatura Aditiva
MADA	Manufatura Aditiva por Deposição a Arco
MAG	Metal Active Gas
MIG	Metal Inert Gas
SLA	Stereolithography
SLM	Selective Laser Melting
SLS	Selective Laser Sintering
TCP	Tool Center Point
TIG	Tungsten Inert Gas
WAAM	Wire Arc Additive Manufacturing
3DP	Three-Dimensional Printing

LISTA DE SÍMBOLOS

mm	milímetro
μm	micrometro
cm	centímetro
L	litros
min	minutos
V	volt
I	ampère
CO_2	dióxido de carbono
Ar	argônio
%	porcentagem
V_{alim}	velocidade de alimentação
V_{des}	velocidade de deslocamento
Al	alumínio
Si	silício
MPa	megapascal
°C	grau Celsius
W	watt
K	kelvin
He	hélio
Mg	magnésio
kg	quilograma
$\pm$	mais ou menos
s	segundo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Objetivo geral	16
1.2	Objetivos específicos	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1	Manufatura Aditiva	17
2.2	Manufatura Aditiva por Deposição a Arco	19
2.3	MADA no Alúminio 4043	23
3	MATERIAIS E MÉTODOS	28
3.1	Materiais	28
3.1.1	Equipamentos	28
3.1.2	Insumos	29
3.1.3	Softwares	30
3.2	Métodos	31
3.2.1	Primeira etapa: avaliação dos diâmetros	31
3.2.2	Segunda etapa: avaliação de trajetórias	34
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
4.1	Otimização por diâmetro de arame	37
4.1.1	Diâmetro 1,2 mm modo pulsado sinérgico	37
4.1.2	Diâmetro 1,2 mm modo curto-circuito	39
4.1.3	Diâmetro 1,0 mm	42
4.1.4	Diâmetro 0,8 mm	46
4.2	Otimização de trajetórias	50
4.2.1	Segmentação da trajetória e definição das velocidades	50
4.2.2	Abordagem baseada na medição de altura	53
4.3	Discussão	56
5	CONCLUSÕES	58
5.1	Trabalhos futuros	59
	REFERÊNCIAS	61
	APÊNDICE A – FLUXOGRAMA GERAL DA METODOLOGIA	63

1 INTRODUÇÃO

A Manufatura Aditiva (MA), também conhecida como impressão 3D, tem revolucionado os processos de fabricação ao permitir a confecção de peças diretamente a partir de modelos tridimensionais computacionais. Nesse método, o objeto é construído camada por camada, o que possibilita criar geometrias complexas sem as limitações impostas pelos processos convencionais de fabricação (ZHAI et al., 2024). Além disso, a MA oferece vantagens como menor consumo de material e energia, redução de custo e maior sustentabilidade no processo produtivo. Esses benefícios tornam a MA aplicável em setores diversos, acelerando o desenvolvimento de produtos e reduzindo o tempo necessário para levá-los ao mercado.

Dentre os processos de manufatura aditiva metálica, destaca-se a Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA), conhecida internacionalmente como *Wire Arc Additive Manufacturing* (WAAM). Nesse método, um arame metálico de alimentação contínua é fundido por meio de um arco elétrico, típico dos processos *Metal Inert Gas* (MIG), *Metal Active Gas* (MAG) ou *Tungsten Inert Gas* (TIG), para depositar metal camada a camada e formar a peça desejada. A MADA caracteriza-se por taxas de deposição elevadas, alta eficiência energética e menor consumo de insumos comparado a outros métodos de MA (RODRIGUES et al., 2019). Essa técnica tem sido pesquisada em setores como o aeroespacial, automotivo, naval e de energia, destacando-se por sua flexibilidade de design e economia de material. Essas características fazem da MADA uma alternativa eficiente e de baixo custo para a produção de peças metálicas volumosas, como é frequentemente exigido em aplicações industriais de grande escala.

As aplicações da manufatura aditiva e da MADA estendem-se por diversas áreas. Na engenharia biomédica, por exemplo, a MA viabiliza a produção de implantes e próteses personalizados com geometria complexa, melhorando a integração com o corpo humano. Na construção civil, embora grande parte dos investimentos esteja voltada à impressão de concreto, há crescente interesse em estruturas metálicas pré-fabricadas via MA, visando otimizar o consumo de material e o tempo de obra. Já na indústria aeronáutica, a aplicação da MADA pode trazer benefícios importantes: permite a confecção de peças metálicas complexas e robustas com redução de peso e aumento da eficiência das aeronaves, como asas e hélices. Esses casos ilustram como a MA por arco pode transformar cadeias produtivas tradicionais, gerando peças customizadas de alto desempenho.

Apesar de seu potencial, a aplicação da MADA em ligas de alumínio apresenta desafios técnicos relevantes. O alumínio possui alta condutividade térmica, baixa viscosidade na condição líquida e forma rapidamente uma camada de óxido superficial, fatores que influenciam diretamente a estabilidade do arco, o controle da poça de fusão

e a qualidade do cordão depositado. Durante a deposição multicamada, o acúmulo de calor no substrato e nas camadas inferiores leva à redução gradual da taxa de solidificação e ao aumento da fluidez do banho metálico, favorecendo irregularidades geométricas, empolamento, porosidade e distorções residuais.

Além disso, parâmetros como corrente, tensão, velocidade de alimentação, distância bico-peça e velocidade de deslocamento exercem influência direta sobre a geometria e as propriedades mecânicas do material depositado, exigindo controle rigoroso e ajustes contínuos ao longo da construção da peça (WAHSH et al., 2018). Dessa forma, problemas típicos da MADA podem surgir, como a formação de microestruturas heterogêneas e aumento de tensões internas nas camadas depositadas, irregularidades no cordão de solda, porosidade interna e distorções dimensionais residuais, prejudicando a integridade estrutural do componente e comprometendo as propriedades mecânicas finais da peça. Esses desafios, incluindo controle térmico rigoroso, monitoramento do arco e estratégias de resfriamento precisam ser superados para garantir a confiabilidade das peças fabricadas em alumínio pela MADA.

Diante desse cenário, a relevância do tema para a engenharia mecânica é evidente. A MADA oferece um caminho promissor para superar as limitações dos processos convencionais na fabricação de peças metálicas complexas. Em particular, a possibilidade de produzir protótipos mais leves e eficientes, integrando materiais avançados e geometrias intrincadas, ressalta o interesse do setor aeronáutico. Ao permitir maior flexibilidade de projeto e redução do número de etapas de fabricação, essa técnica pode ampliar substancialmente a produtividade e a competitividade da indústria. Isso está em consonância com as tendências de inovação da engenharia mecânica, que busca constantemente novos métodos de manufatura para peças de alta performance e responsabilidade ambiental.

A fabricação de perfis aerodinâmicos, como aerofólios, via MADA representa um desafio adicional, pois envolve a reprodução de geometrias curvas complexas que exigem elevada precisão dimensional. A variação da curvatura ao longo da corda do aerofólio impõe mudanças locais na dinâmica térmica e na estabilidade do arco, tornando necessário ajustar a trajetória robótica e a velocidade de deposição de maneira segmentada. Estratégias inadequadas de percurso podem resultar em acúmulo de material, perda de definição geométrica, interrupções do arco e desvios significativos em relação ao contorno teórico.

Para explorar essas questões, a metodologia deste trabalho envolveu revisão sistemática da literatura e experimentos práticos. Inicialmente, foi realizada uma análise crítica das publicações sobre MADA em ligas de alumínio, identificando fundamentos, aplicações e principais desafios do processo. Em seguida, foram conduzidos ensaios experimentais de soldagem por arco com arames de alumínio da liga ER4043 de três

diferentes diâmetros, variando-se a trajetória da tocha durante a deposição. Nesses ensaios, foram fabricadas pré-formas de aerofólios para fins de caracterização e comparação entre os parâmetros testados. As amostras resultantes foram avaliadas em termos de geometria final, visando identificar os efeitos do diâmetro do arame e da trajetória de deposição no desempenho das peças.

1.1 Objetivo geral

Avaliar a influência do diâmetro do arame e das estratégias de trajetória na fabricação de protótipos de aerofólios de alumínio pela Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA), identificando os parâmetros e condições que proporcionam maior estabilidade operacional e precisão geométrica.

1.2 Objetivos específicos

1. Investigar o comportamento da deposição multicamada utilizando arames de alumínio ER4043 nos diâmetros de 1,2 mm, 1,0 mm e 0,8 mm, analisando estabilidade do arco, continuidade dos cordões, qualidade superficial e viabilidade operacional.
2. Determinar, para cada diâmetro avaliado, combinações adequadas de corrente, tensão, avanço de arame, distância bico-peça, incremento interpasse e modo de transferência metálica, visando estabelecer parâmetros de referência para a construção de paredes e perfis curvos.
3. Desenvolver e testar diferentes estratégias de trajetória robotizada aplicadas ao perfil NACA 2412, incluindo segmentação do contorno e variação da velocidade de deslocamento ao longo de regiões críticas.
4. Analisar a influência da velocidade de deposição sobre a geometria final do aerofólio, especialmente em regiões de alta curvatura, e propor ajustes capazes de compensar variações locais de altura e volume depositado.
5. Fabricar um protótipo de aerofólio final com dimensões ampliadas e número elevado de camadas, avaliando sua consistência geométrica em relação ao modelo teórico e a eficácia das estratégias desenvolvidas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Manufatura Aditiva

A norma ABNT NBR ISO/ASTM 52900 (2025) define a Manufatura Aditiva como um processo de união de materiais para fabricação de peças caracterizado pela adição de material em camadas a partir de um modelo tridimensional gerado por um sistema de Desenho Assistido por Computador - *Computer-Aided Design* (CAD), diferentemente das metodologias de manufatura subtrativa e formativa. A MA pode ser aplicada utilizando uma ampla variedade de materiais, incluindo metais, polímeros, cerâmicas e compósitos, o que amplia significativamente suas possibilidades de uso. Inicialmente desenvolvida na década de 1980, foi primeiramente empregada para auxiliar na criação de modelos visuais de um objeto final (prototipagem rápida). Nos últimos anos, esse processo tem ganhado bastante espaço em toda a cadeia de fabricação devido ao desenvolvimento de novas tecnologias e materiais, permitindo sua aplicação em áreas como saúde, automobilística e aeronáutica (ZHOU et al., 2024).

Esse processo tem se consolidado como uma tecnologia estratégica na indústria por sua versatilidade, eficiência e capacidade de inovação. Entre seus principais benefícios estão a produção rápida e de baixo custo de protótipos funcionais, a eliminação da necessidade de ferramentas específicas (amplamente necessárias em processos de usinagem e fundição, por exemplo), diminuindo o custo de produções de baixo volume, a possibilidade de fabricar geometrias complexas que não poderiam ser fabricadas por métodos convencionais e a otimização topológica, resultando em objetos mais leves e resistentes, diminuindo o consumo de material e energia. Outros avanços incluem o reparo eficiente de peças de alto valor e a resposta rápida a crises de abastecimento, como observado durante a pandemia de 2020. Com aplicações consolidadas, a manufatura aditiva representa um vetor de transformação no paradigma industrial, impulsionando práticas mais sustentáveis, personalizadas e resilientes (TOYSERKANI et al., 2021).

Os métodos de manufatura aditiva evoluíram para atender à demanda por estruturas complexas com alta resolução, rápida prototipagem e melhor desempenho mecânico. Entre as técnicas mais difundidas, destaca-se a Modelagem por Deposição Fundida - *Fused Deposition Modelling* (FDM), que extrude filamento termoplástico fundido camada a camada, oferecendo baixo custo e simplicidade, mas sofrendo de limitações como baixa resistência mecânica e acabamento “em degraus”.

A Sinterização Seletiva em Leito de Pó - *Selective Laser Sintering* (SLS) e a Fusão Seletiva por Laser - *Selective Laser Melting* (SLM) utilizam laser para unir pós de polímeros ou metais, resultando em peças de alta qualidade e complexidade,

embora com custos elevados e processo relativamente lento. Variantes com aglutinante, conhecidas como Impressão Tridimensional por Ligação de Pó - *Three-Dimensional Printing* (3DP), permitem a utilização de cerâmicas e metais a partir de pós, mas geram maior porosidade. Na impressão de cerâmica, a Impressão por Jato de Tinta - *Inkjet* e a Modelagem de Contorno - *Contour Crafting* depositam suspensões líquidas ou massas de concreto, viabilizando estruturas avançadas e de grande porte, embora com resolução limitada e desafios de aderência entre camadas.

Outros processos complementares ampliam ainda mais o escopo da MA. A estereolitografia - *Stereolithography* (SLA) cura resinas fotossensíveis por luz ultravioleta, produzindo geometrias finas (até 10 μm) com excelente acabamento, mas com alto custo e poucas opções de material. A Deposição de Energia Direcionada - *Directed Energy Deposition* (DED), incluindo sua variante Manufatura Aditiva por Deposição a Arco, funde arames ou pós metálicos in situ por meio de laser, feixe de elétrons ou arco elétrico, com altas taxas de deposição e um envelope construtivo amplo, indicada para componentes metálicos grandes e reparos, porém com menor precisão. Por fim, a Fabricação de Objetos Laminados - *Laminated Object Manufacturing* (LOM) lamina e corta folhas ou rolos de material (papel, polímero, metal), unindo-os sucessivamente. Esse processo é eficiente para peças de grande porte, mas apresenta resolução e acabamento inferiores, além de exigir maior esforço de pós-processamento. Conforme a Tabela 1, cada método de MA combina diferentes insumos (filamento, resina, pó, arame) e fontes de energia (luz, laser, arco elétrico), ofertando um leque de aplicações que vão da prototipagem rápida a componentes críticos nas indústrias aeroespacial, biomédica, da construção civil e além (NGO et al., 2018).

Apesar dos avanços, a manufatura aditiva ainda enfrenta obstáculos técnicos e econômicos. As propriedades mecânicas das peças podem ser inferiores às dos materiais convencionais. Por exemplo, as camadas sucessivas podem gerar anisotropia e zonas frágeis que requerem tratamento térmico ou processo de refino. Em muitos casos de metais produzidos por fusão (como na MADA), surgem defeitos como porosidade, trincas e tensões residuais que afetam o desempenho final. O controle dimensional também é crítico, pois a resolução de impressão e o acabamento superficial geralmente não atingem a qualidade exigida sem etapas adicionais de usinagem ou polimento.

Além disso, o leque de materiais imprimíveis é ainda mais restrito que o da manufatura tradicional. Cerâmicas e metais especiais demandam desenvolvimento de pós ou arames adequados, e muitos polímeros de engenharia ainda não possuem formulações ideais. A velocidade de construção é outro limitador, embora melhore constantemente, a deposição camada a camada continua lenta para produção em massa, restringindo a MA tipicamente a protótipos ou lotes pequenos. Do ponto de vista econômico, os equipamentos e matérias-primas (pós metálicos, resinas especializadas, filamentos) têm custos elevados, o que pode inviabilizar o investimento em larga escala,

especialmente em países em desenvolvimento. Suas vantagens e desafios ainda mantém a MA como uma tecnologia emergente: é promissora, mas requer melhorias em velocidade, variedade de materiais e padronização para alcançar maturidade industrial (ZHAI et al., 2024).

Tabela 1 – Resumo dos métodos de manufatura aditiva

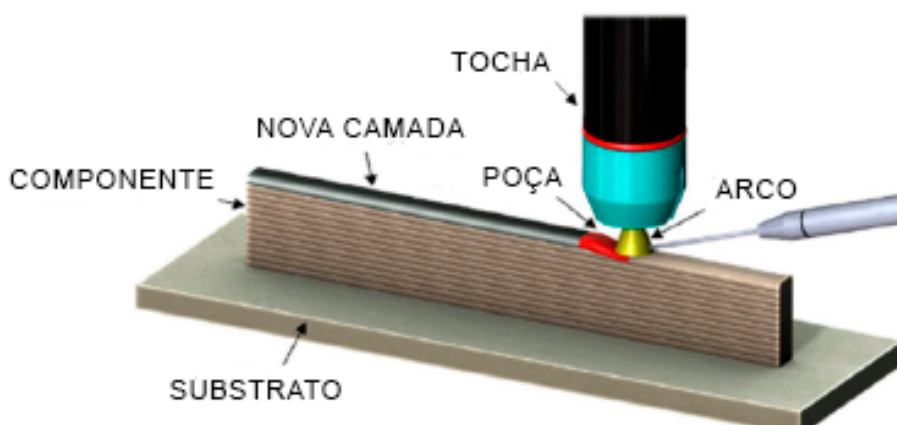
Métodos	Materiais	Aplicações	Benefícios	Limitações	Faixa de resolução (µm)
Modelagem por Deposição Fundida (FDM)	Filamentos contínuos de polímeros termoplásticos e polímeros reforçados com fibras	Prototipagem rápida, brinquedos, compósitos avançados	Baixo custo, alta velocidade, simplicidade	Baixa resistência mecânica, materiais limitados (somente termoplásticos), acabamento em camadas	50–200 (µm)
Fusão de Pó em Leito (SIS, SLM, 3DP)	Pós compactados metálicos, ligas metálicas, polímeros e cerâmicas (3DP)	Eletrônica, aeroespacial, estruturas leves (lattices), trocadores de calor	Alta resolução, alta qualidade	Impressão lenta, custo elevado, alta porosidade nos processos com aglutinante (3DP)	80–250 (µm)
Impressão a jato de tinta e contorno	Dispersão de partículas em líquido (tinta ou pasta), cerâmica, concreto e solo	Biomédico, grandes estruturas, construção civil	Impressão de grandes estruturas, impressão rápida	Manutenção da trabalhabilidade, resolução grosseira, baixa adesão entre camadas	Jato: 5–200, Contorno: 25–40 (µm)
Estereolitografia (SLA)	Resinas com monômeros fotoativos	Biomédico, prototipagem	Alta resolução, alta qualidade	Materiais limitados, impressão lenta, caro	10 (µm)
Deposição Direta de Energia (DED)	Ligas metálicas em pó ou arame; cerâmicas e polímeros híbridos	Aeroespacial, retrofit, reparo, biomédico	Redução no tempo e custo, boas propriedades mecânicas, controle microestrutural e composicional, ideal para reparos	Baixa resolução, baixa qualidade superficial, necessidade de suporte denso, dificuldade em imprimir detalhes finos	250 (µm)
Fabricação por Laminação de Objetos (LOM)	Compósitos poliméricos, cerâmicas, papel, fitas e rolos metálicos	Papelaria, fundição, eletrônica, estruturas inteligentes	Baixo custo, ampla gama de materiais, ideal para grandes estruturas	Qualidade superficial inferior, baixa precisão dimensional, limitação para formas complexas	Depende da espessura das lâminas

Fonte: adaptado de Ngo et al. (2018).

2.2 Manufatura Aditiva por Deposição a Arco

A Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA) é um processo de manufatura aditiva do tipo DED em que uma tocha de soldagem alimenta continuamente um arame sólido, gerando um arco elétrico que atua como fonte de calor, promovendo a fusão do material de adição em camadas sobrepostas, conforme a Figura 1. A MADA tem sido empregada sobretudo na manufatura de componentes metálicos de grande porte pois oferece alta taxa de deposição de material, diferentemente dos métodos de SLS e SLM, que embora ofereçam grande precisão, possuem baixa taxa de deposição (RODRIGUES et al., 2019).

Figura 1 – Representação esquemática do processo MADA



Fonte: adaptado de Rodrigues et al. (2019).

Associada a melhor eficiência energética e custo operacional competitivo, essa tecnologia evoluiu rapidamente nos últimos anos, impulsionada pelo aumento da disponibilidade de fontes de energia de arco e de sistemas robóticos de controle e posicionamento, o que ampliou sua aplicabilidade industrial. A MADA tem permitido reduções significativas de tempo e material na fabricação de peças pesadas e complexas, sem a necessidade de moldes ou ferramentas dispendiosas. Essa flexibilidade e economia de material fazem da MADA uma técnica promissora para a fabricação de estruturas metálicas de grande escala, sendo frequentemente destacada em setores como indústria aeronáutica, automotiva e militar (SARIKAYA et al., 2024).

Um dos principais processos envolvidos na MADA é a soldagem *Gas Metal Arc Welding* (GMAW), comumente conhecida como soldagem MIG/MAG. Nessa técnica, um fio metálico não revestido é alimentado de forma contínua por um alimentador, e um arco elétrico constante entre o arame e a peça funde o arame depositando-o na poça de fusão. O gás de proteção, fornecido externamente pela tocha, protege a poça de fusão da contaminação atmosférica. Quando o gás é inerte (ex.: argônio ou hélio) denomina-se MIG, e quando é ativo (ex.: CO_2 ou misturas com oxigênio/hidrogênio) denomina-se MAG. O processo normalmente emprega corrente contínua com polaridade inversa (eletrodo positivo), o que confere maior estabilidade ao arco e melhor penetração no metal-base. A soldagem GMAW é versátil e atende a uma ampla gama de ligas metálicas (aços carbono, inoxidáveis, alumínio, cobre etc.), permitindo soldagens em várias posições e com elevada eficiência de fusão. Como principais variáveis de controle do processo, destacam-se a corrente e a tensão de soldagem (que determinam a energia fornecida e o comprimento de arco), a velocidade de alimentação do arame e de deslocamento da tocha (que definem a taxa de deposição e o aporte térmico), a composição do gás de proteção e a distância entre o bico de contato e a peça (DBCP).

No contexto da soldagem GMAW aplicável à MADA, o metal de adição pode ser transferido do eletrodo para a poça de fusão por diferentes modos de transferência metálica, cada um com particularidades próprias. O modo de transferência por curto-circuito (GMAW-S) ocorre em baixas correntes e arco curto: o arame toca momentaneamente a poça, causando repetidos curtos-circuitos que fundem pequenas gotas a cada ciclo. Esse modo produz baixo aporte térmico, permitindo soldagens em todas as posições e boa tolerância a desajustes de montagem, mas restringe-se a chapas finas pela limitada penetração e taxa de deposição. Na transferência globular, gotas maiores se formam e caem sob ação da gravidade, geralmente com mistura de argônio/ CO_2 , caracterizando gotículas irregulares que geram muitos respingos e cordões irregulares; esse modo é mais comum com CO_2 puro e proporciona taxas de deposição médias, sendo hoje muitas vezes evitado devido ao alto nível de respingos e eficiência reduzida. A transferência spray se dá em correntes elevadas sob gases inertes ou misturas ricas em argônio: forma-se um fino jato contínuo de gotículas que atravessam o arco, resultando em cordões largos, pouca projeção de respingos e alta penetração; entretanto, por possuir alta fluidez, esse modo limita-se usualmente a soldagens em posição plana ou horizontal (ou em processo pulsado para viabilizar posições verticais). O modo pulsado (GMAW-P) intercala pulsos de corrente alta e baixa, permitindo que mesmo com corrente média baixa se obtenha transferência similar ao spray, reduzindo o calor aplicado sem perder estabilidade, o que possibilita soldagem em diversas posições e reduz os problemas de respingo (MESSLER ROBERT W., 1999).

A composição do gás de proteção também exerce papel crucial na MADA por GMAW. Gases à base de argônio (inerte) tendem a produzir um arco mais estável e uma poça de fusão mais fluida, sendo frequentemente usados para ligas de alumínio e aços inoxidáveis, enquanto gases ativos (como CO_2 ou Argônio+ CO_2) aumentam a penetração e são mais econômicos para aços carbono, porém geram maior projeção de respingos e desgaste do arame. Misturas binárias de Ar/ CO_2 (por exemplo, 75% Ar + 25% CO_2) equilibram desempenho e custo, reduzindo respingos no aço carbono. Pequenas adições de oxigênio ao argônio (1–2%) podem melhorar ainda mais a estabilidade do arco e a fusão em alguns materiais ferrosos. Por outro lado, gases pesados como hélio podem ser adicionados para aumentar a energia de fusão em ligas de alumínio ou em alturas de arco maiores. O tipo de gás utilizado altera não apenas a transferência metálica mas também o formato e as propriedades do cordão: gases inertes puros produzem transição em spray mais facilmente, enquanto gases ativos induzem transferência globular e maior penetração (TEIXEIRA et al., 2024).

A velocidade de alimentação do arame (V_{alim}) e a velocidade de deslocamento da tocha (V_{des}) são parâmetros interdependentes que controlam a taxa de deposição e o aporte térmico na MADA. Em fontes CV (tensão constante), o aumento da V_{alim} eleva a corrente de soldagem automática (para manter o arco estável), o que resulta

em maior taxa de fusão do arame e maior largura do cordão. Assim, velocidades de alimentação maiores tendem a aumentar a profundidade e largura de penetração (e a taxa de construção), mas também concentram mais calor na peça, potencialmente aumentando distorções e defeitos térmicos. Inversamente, diminuir a V_{alim} reduz a deposição e o calor aplicado por camada. Da mesma forma, a relação entre V_{alim} e velocidade de deslocamento (razão material/tempo) define a geometria final da peça: se a alimentação for muito rápida em relação ao avanço, os passes ficam mais elevados; se for muito lenta, o cordão pode ficar fino e instável. A modulação da V_{alim} é estratégia importante para controlar o aporte térmico acumulado: geralmente se ajusta a alimentação do fio juntamente com deslocamento para obter cordões com altura e largura desejadas, minimizando defeitos (WEMAN, 2003).

A distância entre o bico de contato e a peça (DBCP) também influencia a estabilidade do arco e a forma do cordão na MADA. Em geral, um aumento da DBCP diminui a corrente efetiva no arco (devido à maior extensão do eletrodo) e aumenta a resistência do arame, o que estreita o cordão, reduz profundidade de penetração e dilui menos o metal-base. Ensaaios com processos similares mostram que, ao aumentar a DBCP, as larguras e profundidades dos cordões diminuem enquanto o reforço (altura do cordão) cresce. Por outro lado, distâncias excessivamente curtas (abaixo de 10–15 mm) geram arco instável e podem provocar instabilidades no método de transferência, sendo portanto desaconselhadas (MILLER ELECTRIC, 2013). A escolha do valor de DBCP é dependente do modo de transferência metálica (curto-circuito, globular, spray/pulsado), do diâmetro do arame, da composição do gás e da tensão/corrente empregadas. A literatura técnica fornece faixas orientativas como, por exemplo, valores típicos da ordem de 10–15 mm para transferência por curto-circuito em aços, enquanto para soldagem de alumínio (devido à maior condutividade térmica e diferenças de comportamento do arco) faixas ligeiramente maiores (12–20 mm) (ESAB, 2025).

Além disso, a fonte de soldagem utilizada geralmente trabalha em circuito corrente constante - *Constant Current* (CC) ou tensão constante - *Constant Voltage* (CV), de modo que a corrente e tensão de soldagem determinam o aporte térmico aplicado. Em modo CC a máquina mantém a corrente praticamente constante enquanto a tensão varia conforme o comprimento do arco, já em modo CV a tensão é mantida estável e a corrente varia em função da resistência e do comprimento do arco (comum em processos com alimentação contínua de arame, como MADA). Fontes modernas podem operar nos dois modos ou combinar características para otimizar penetração, produtividade e qualidade do cordão. A corrente de soldagem controla diretamente a fusão do arame e a taxa de deposição: correntes maiores fornecem mais energia, resultando em cordões mais profundos e largos (mantendo-se demais parâmetros constantes). A tensão de soldagem, por sua vez, ajusta basicamente o comprimento do arco; aumentando a tensão, o arco se alonga e o cordão tende a alargar-se (aumentando a razão

largura/profundidade) sem necessariamente alterar muito a penetração se a corrente permanecer constante. Dessa forma, o conjunto desses parâmetros deve ser ajustado de forma equilibrada para garantir boa fusão, contorno geométrico adequado e evitar defeitos térmicos nas camadas depositadas (MESSLER ROBERT W., 1999).

As estratégias de percurso da tocha, ou padrões de trajetória, na construção da peça influenciam tanto a geometria final quanto as características térmicas do processo. Diversos padrões de preenchimento foram desenvolvidos para MADA, devendo ser escolhidos conforme a geometria da peça e as propriedades mecânicas desejadas. Por exemplo, o trajeto de contorno (*contour*) segue o perímetro da camada, reforçando o perfil da peça e ajudando a evitar anisotropias internas, enquanto o padrão de zig-zag bidirecional (*raster*) preenche a área interna de forma sistemática, normalmente exigindo rotação periódica do objeto durante a deposição para manter a regularidade. Outros padrões, como preenchimento em hélice (*spiral*), vasos concêntricos ou escaneamento cruzado, podem ser usados para equilibrar as tensões térmicas e otimizar a qualidade superficial. Além disso, a deposição pode ser feita de forma unidirecional ou bidirecional (alternando sentido entre camadas), com controle ou não da temperatura interpasse. Uma estratégia comum de controle térmico é o Controle de Temperatura Intercamada (CTI), onde a camada seguinte só é depositada após a peça atingir determinada temperatura mais baixa, evitando sobreaquecimento contínuo do substrato. O uso de CTI reduz a altura de cada camada e aumenta a largura do cordão nas camadas superiores, uma vez que a poça de fusão fica mais fluida em temperaturas pré-aquecidas maiores. Portanto, a escolha do padrão de trajetória (contorno, zig-zag, hélice etc.) e o controle térmico (como o CTI) são elementos de ajuste fino no processo MADA, permitindo otimizar a geometria da peça e reduzir defeitos relacionados ao ciclo térmico (DING et al., 2014).

2.3 MADA no Alúminio 4043

A liga de alumínio 4043 (designação ER4043 ou AlSi5) faz parte da série 4000 (Al–Si), sendo composta tipicamente por cerca de 4,5–6,0% de silício, além de traços de ferro, magnésio, cobre, titânio e outros elementos. Essa adição de silício promove reforço por solução sólida e confere excelente fluidez do metal fundido (útil em fundição) e baixa contração térmica na solidificação. A liga 4043 é amplamente utilizada como metal de adição em soldagem GMAW de alumínio (sob o nome de Arame ER4043) devido à sua ótima soldabilidade e resistência à corrosão, evitando fissuras na junta soldada. É comum em aplicações industriais diversas, como estruturas de veículos e aeronaves, equipamentos domésticos e como solda de juntas em ligas da série 6xxx e 5xxx, atuando também na união de peças fundidas ou laminadas compatíveis com Al-Si (AMERICAN WELDING SOCIETY, 1999).

Em termos de propriedades metalúrgicas, o 4043 não é tratável termicamente (liga hiper-saturada Al–Si), apresentando microestrutura formada por grãos primários de alumínio α , entremeados por eutético rico em silício. Essa microestrutura resulta em característica ductilidade elevada e resistência mecânica relativamente baixa: por exemplo, resistência à tração de 145 MPa, limite de escoamento de 70 MPa, e alongamento de 22%. A tenacidade e ductilidade favoráveis tornam-na menos suscetível a trincas de soldagem.

Segundo Zhang et al. (2022), a fluidez das ligas Al–Si aumenta significativamente com o teor de silício, o que favorece o escoamento do metal fundido e o preenchimento de regiões estreitas durante a solidificação. A liga ER4043, contendo cerca de 5% Si, enquadra-se nesse comportamento, apresentando boa capacidade de preenchimento e menor susceptibilidade a defeitos associados à alimentação do banho metálico. Em MADA, essa elevada fluidez é vantajosa para garantir continuidade do cordão, mas também exige controle rigoroso da geometria, pois a poça de fusão permanece altamente móvel e pode colapsar ou se espalhar excessivamente se não houver suporte térmico e deposição adequados.

Do ponto de vista térmico, o ponto de fusão é baixo (início em 574 °C até 632 °C), o que facilita a fusão com energia moderada, apresenta alta condutividade (cerca de 163 W/mK) e elevado coeficiente de expansão térmica ($22,1 \mu\text{m m}^{-1}\text{°C}^{-1}$). Essas propriedades implicam que o calor aplicado se dispersa rapidamente no material. Adicionalmente, a liga 4043 apresenta boa resistência à corrosão atmosférica e marinha (melhor do que muitas ligas 5xxx). Globalmente, essas características fazem da liga 4043 um metal de adição de uso geral em soldagem de alumínio (DAVIS, 2001).

A manufatura aditiva por deposição a arco com alumínio 4043 herda desafios inerentes ao material. Em primeiro lugar, a fina película protetora de óxido de alumínio se regenera instantaneamente em contato com o ar, possuindo ponto de fusão muito elevado (2300 °C). Esse óxido deve ser rompido pelo arco elétrico para obter fusão metálica e, portanto, exige-se uso de modos de transferência especializados, como GMAW pulsado ou *Cold Metal Transfer* (CMT) e tensões elevadas no início do arco. Em segundo lugar, o alumínio é altamente eletropositivo e reativo: o arame de 4043 pode adsorver umidade e contaminantes superficiais (hidrocarbonetos, óleo) durante seu manuseio, que ao serem fundidos fornecem hidrogênio ao metal líquido. Esse hidrogênio causa porosidade metálica (bolhas finas distribuídas), bastante comum em MADA de alumínio. Como o alumínio resfria e contrai muito (~23% de contração volumétrica do fundido), a formação de vazios de retração é outro mecanismo de porosidade frequente. Além disso, a condutividade térmica elevada do alumínio faz o calor dispersar rapidamente, exigindo níveis relativamente altos de energia de arco para manter poça de fusão estável. Por outro lado, o rápido resfriamento e repetidas ciclagens térmicas levam à formação de tensões residuais elevadas e tendência a

empenamento/distorsão na peça final (DAVIS, 2001).

No processo MADA com 4043, diversos parâmetros de soldagem influenciam fortemente a deposição. O modo de transferência metálica (curco-circuito, spray, pulsado, CMT) determina a quantidade de calor e gotas depositadas por batimento de arco. Em alumínio puro/GMAW, o modo curto-circuito tradicional é instável, por isso costuma-se usar GMAW pulsado ou CMT para minimizar espirros e melhorar a fusão do arame. Em geral, opta-se por MADA em modo pulsado ou por arco pulsado em combinação com avanço controlado de arame (GIERTH et al., 2020).

O tipo de gás de proteção também é crítico: tipicamente usa-se argônio puro para alumínio, ou misturas Ar–He (por exemplo, 75% Ar/25% He). O hélio aumenta a energia do arco e penetração, auxiliando a romper o óxido, enquanto o argônio proporciona estabilidade. A velocidade de alimentação do arame (V_{alim}) acoplada à corrente e à tensão de arco define a taxa de deposição e o aporte térmico. Na prática, utiliza-se uma relação sinérgica (programa GMAW) que ajusta automaticamente a V_{alim} à medida que a tensão cresce. Em experimento de Wahsh et al. (2018) com alumínio 5356, observou-se que elevar a tensão de 19,2 V a 23,2 V fazia o sistema automaticamente aumentar a alimentação de arame, produzindo cordões mais largos e volumosos. Conforme descrito por Wahsh et al. (2018), “ao aumentar a tensão, o programa sinérgico ajusta a velocidade do fio e produzem-se cordões maiores”. Dessa forma, maior corrente/tensão (mais calor) e maior avanço de arame resultam em cordões de maior seção (mais altos e largos), enquanto velocidades de avanço mais rápidas tendem a afinar o cordão. A DBCP também influencia, pois bicos muito afastados exigem tensões mais altas para manter arco estável e pioram a proteção gasosa, enquanto bicos muito próximos podem tocar a peça e cortar o cordão depositado.

Os parâmetros do processo têm impacto direto na forma final da deposição. Cordões mais quentes e lentos geralmente resultam em maior altura e largura, enquanto cordões mais frios e rápidos tendem a ser mais estreitos e planos. Consoante Wahsh et al. (2018), dentro da faixa de deposição ideal para alumínio, “aumentar o aporte térmico apenas afeta o tamanho do cordão: à medida que a tensão cresce, são obtidos cordões maiores”. Ou seja, para um dado substrato e modo de transferência, maior corrente/tensão e avanço de fio aumentam volume depositado por unidade de comprimento, elevando tanto a altura quanto a largura do cordão. A estratégia de sobreposição entre cordões paralelos (espessura de cada cordão) e a distância entre passagens sucessivas determinam ainda a largura total da parede construída. Parâmetros limitantes, como avanço muito rápido ou muito lento, podem causar defeitos de geometria: avanço muito rápido pode levar a cordões descontínuos ou “faring”(interrupção na fusão), enquanto avanço muito lento pode acumular calor excessivo e formar cordões excedentes (“overflow”). Além disso, arcos instáveis (causados por ajustes fora da faixa adequada) provocam respingo de metal e irregularidades superficiais.

Quanto à precisão geométrica, observa-se que regimes de alta deposição sacrificam resolução: cordões largos se fusionam mais facilmente, mas podem exceder a inclinação desejada ou causar encurvamento da peça. Parâmetros moderados geram cordões mais estreitos, melhor resolvidos (melhor resolução e acurácia dimensional) em comparação com parâmetros de maior aporte térmico. Isso reforça que há uma troca entre taxa de deposição e exatidão da geometria. O controle de trajetória (deposição de camadas finas, arrefecimento entre passes, técnicas de transição de borda) é empregado para manter a forma pretendida das superfícies, especialmente em geometrias complexas como aerofólios.

Os parâmetros também afetam a qualidade dos cordões depositados. Defeitos como porosidade e fissuras são frequentemente observados em peças de MADA com alumínio. A porosidade surge principalmente pela captura de hidrogênio no metal fundido e por retrações de solidificação. Peças construídas com 4043 tendem a apresentar pequenas bolhas esféricas dispersas por causa da reação hidrogênio-água, especialmente se o arame ou a gás contiver umidade. Solidificação rápida e aumento repetido de temperatura também dificultam o preenchimento de contrações, contribuindo para poros oriundos de retração. Trincas podem aparecer em condições críticas: embora o 4043 seja menos suscetível a fissuração do que ligas Al-Mg (5000/6000), flutuações acentuadas de calor podem gerar trincas de solidificação ao longo dos contornos dos cristais primários. Além disso, se o aporte térmico for insuficiente para fusão adequada entre camadas, ocorrem falta de fusão ("*lack-of-fusion*"), resultando em fissuras internas longitudinais no cordão depositado. Wahsh et al. (2018) documentaram que parâmetros muito baixos de calor provocaram fraturas internas longitudinais ("fissuras internas ao longo do cordão") em amostras de alumínio depositado.

Observa-se, com alguma frequência, o fenômeno denominado empolamento dos cordões quando a sobreposição vertical entre passes é excessiva e não há suporte mecânico ou térmico suficiente nas camadas inferiores. Nesse caso, o metal fundido, ao solidificar parcialmente, tende a acumular-se localmente formando um ressalto convexo na superfície (um "inchaço"), resultado da combinação entre aporte de metal superior ao que a camada subjacente consegue suportar, tensão superficial do banho metálico e tempo de solidificação insuficiente. Ou seja, a poça não esfria e estabiliza rápido o bastante para manter a forma desejada. O empolamento caracteriza-se por defeitos superficiais localizados, perda de precisão geométrica e irregularidade na continuidade entre camadas (DING et al., 2014). Em contraste, o empenamento refere-se a deformações dimensionais de maior escala, originadas pela contração térmica não uniforme de todo o corpo construído e pelo acúmulo de tensões residuais durante ciclagens térmicas repetidas. O empenamento produz curvaturas ou dobras globais da peça e é particularmente agravado nas ligas de alumínio pela alta condutividade térmica e pelo coeficiente de expansão, que promovem gradientes térmicos acentuados

e rápida dissipação do calor. Enquanto o empolamento está associado primariamente ao desequilíbrio local entre aporte e suporte/solidificação, o empenamento decorre de efeitos térmicos e mecânicos acumulativos em escala estrutural (KOZAMERNIK; BRACUN; KLOBCAR, 2020).

Desta forma, um aspecto crucial no MADA de alumínio é o controle da temperatura entre camadas (interpasse). Mantendo a peça muito quente (sem resfriar adequadamente) acumula-se calor em camadas inferiores, o que causa grãos grosseiros, aumento da porosidade e redução da ductilidade. Por outro lado, permitir arrefecimento excessivo diminui taxa de deposição (espera ativa). Deve-se estabelecer um intervalo de temperatura interpasse moderado. Por exemplo, Wahsh et al. (2018) aconselham escolher uma temperatura interpasse e um limite máximo de aporte de calor para evitar captação de hidrogênio por solidificação rápida e fissuração térmica. Ferramentas de controle automático de temperatura (sensores térmicos no substrato) podem pausar ou ativar fluxo de ar quando necessário. Em adição, estratégias de resfriamento ativos, como ar forçado por ventiladores ou banhos de água temporários, auxiliam a dissipar calor acumulado. Técnicas complementares como deformação a frio (rolamento) ou tratamentos térmicos intercamada têm sido propostas para refinar a microestrutura e liberar tensões.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

3.1.1 Equipamentos

Para a realização dos experimentos, foram empregados equipamentos industriais de soldagem e robótica. Foi utilizado um manipulador robótico modelo Yaskawa Motoman HP20D, um braço articulado de seis eixos projetado para aplicações de alta velocidade e boa acessibilidade ao envelope de trabalho. Suas especificações técnicas de maior importância para este trabalho são a capacidade de carga útil (20 kg), o alcance horizontal nominal (1717 mm), o alcance vertical nominal (3063 mm) e a repetibilidade ($\pm 0,06$ mm), parâmetros que condicionam diretamente a escolha de porta-ferramenta, o programa de trajetória e a precisão posicional durante a deposição do arco. A seleção do HP20D considerou, portanto, tanto a necessidade de suporte mecânico à tocha e ao carretel de arame quanto a exigência de repetibilidade e alcance para a varredura dos perfis manufaturados. A estação de trabalho com o HP20D é apresentada na Figura 2. Associado ao manipulador, utilizou-se o controlador DX100 do fabricante Yaskawa, responsável pelo controle de trajetória e pela execução dos programas gerados off-line.

Figura 2 – Estação de trabalho com manipulador robótico Yaskawa Motoman HP20D



Fonte: próprio autor.

A fonte de alimentação empregada foi a linha DIGIPlus A7, produzida pela IMC Soldagem. Trata-se de uma fonte eletrônica multiprocessada com controle digital do arco concebida para operações multiprocessos (incluindo variantes do GMAW compatíveis com deposição para MADA), com recursos de parametrização fina da dinâmica de corrente (rampa, indutância e controle de curto-circuito) que influenciam a transferência metálica e a estabilidade do arco. A utilização desta fonte permitiu ajustar curvas de corrente/tensão para comparar efeitos de diâmetro de arame e estratégias de trajetória sobre a geometria e integridade do cordão depositado.

Além disso, a fonte possui um alimentador de arame integrado, dispositivo motorizado acoplado à tocha que assegura alimentação contínua do arame de soldagem, compatível com arames de alumínio de 0,8 a 1,2 mm, possibilitando ajuste da velocidade de alimentação sincronizada com o movimento do robô. Ademais, conta com uma estação de aquisição de dados, usada para monitorar o processo em tempo real, armazenar os parâmetros aplicados e ajustar configurações conforme necessário durante os ensaios.

Foram também empregados instrumentos de medição direta: um paquímetro analógico para medições geométricas dos cordões (largura, altura e demais dimensões externas) e um termômetro infravermelho para monitoramento de temperatura superficial do substrato e da zona adjacente ao cordão. Para controle da exposição a fumos de soldagem e para reduzir contaminação do ambiente experimental, foi empregado um exaustor móvel de filtragem local Nederman FILTERCART 3M, posicionado adjacente à área de deposição para captura de partículas e gases gerados durante o processo. Esse equipamento contribuiu para a segurança dos operadores e para a estabilidade das condições de ensaio.

3.1.2 Insumos

Como metal de adição foram utilizadas bobinas de liga de alumínio ESAB classe ER4043. Os diâmetros dos arames empregados foram 0,8 mm, 1,0 mm e 1,2 mm, escolhidos para investigar o efeito do diâmetro sobre a taxa de deposição, estabilidade do arco, alimentação de arame e qualidade geométrica do cordão. Os substratos empregados consistiram de peças em alumínio fundido, com dimensões aproximadas de 300×300×10 mm, representativas das ligas usadas em aplicações aeronáuticas e industriais para perfis. Antes de cada ensaio, as peças foram submetidas a um procedimento de lixamento para remoção de camada oxidada superficial e promoção de rugosidade controlada, visando garantir adequada molhabilidade do metal de adição, reduzir a ocorrência de porosidade por contaminação e melhorar a adesão entre o cordão depositado e a matriz base.

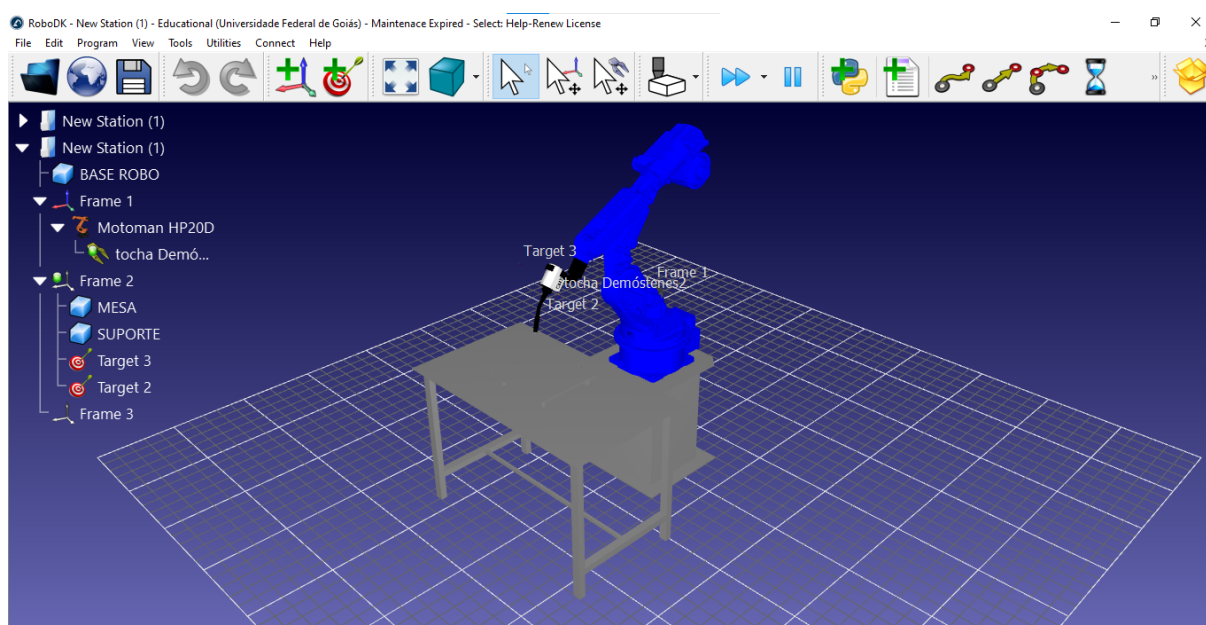
Durante o processo de deposição, utilizou-se argônio puro (pureza 99,99%)

como gás de proteção, com vazão controlada e ajustada em função do diâmetro do arame, da corrente de soldagem e da configuração da tocha. O emprego de argônio puro assegura proteção eficaz da poça de fusão contra contaminação por oxigênio, nitrogênio e vapor d'água, reduzindo a formação de óxidos superficiais e porosidade, além de proporcionar maior estabilidade do arco e melhor acabamento superficial do cordão.

3.1.3 Softwares

Para o desenvolvimento das trajetórias e da documentação geométrica, utilizou-se o software Autodesk Inventor 2023, que possibilitou a modelagem paramétrica dos perfis e a geração de arquivos geométricos CAD compatíveis com ferramentas de Manufatura Assistida por Computador - *Computer-Aided Manufacturing* (CAM). Complementarmente, as simulações e a programação off-line do robô foram realizadas no ambiente RoboDK, que permite criar simulações cinemáticas, validar trajetórias, detectar possíveis colisões e gerar códigos pós-processados para diversos controladores robóticos, funcionalidades essenciais para garantir que as trajetórias testadas experimentalmente fossem exequíveis e reproduzíveis. A interface do RoboDK com o modelo da estação de trabalho é apresentado na Figura 3. A integração entre modelagem CAD (Inventor) e simulação (RoboDK) constituiu o fluxo de trabalho para converter a geometria do aerofólio em trajetórias robotizadas otimizadas para MADA.

Figura 3 – Estação de trabalho modelada no software RoboDK



Fonte: próprio autor.

3.2 Métodos

O procedimento experimental foi dividido em duas etapas sequenciais: avaliação inicial dos cordões de solda com arames de diferentes diâmetros, a fim de investigar a influência dos parâmetros de soldagem (tensão, corrente, vazão de gás, DBCP, velocidade de deslocamento, velocidade de alimentação, incremento interpasse, etc.) e buscar um *setup* de referência para a próxima etapa. Posteriormente, seguiu-se à avaliação da influência da estratégia de trajetória na fabricação dos perfis de aerofólio NACA 2412.

A estrutura geral da metodologia adotada neste trabalho encontra-se sintetizada no Apêndice A, onde é apresentado um fluxograma com todas as etapas executadas.

3.2.1 Primeira etapa: avaliação dos diâmetros

Inicialmente foram realizados ensaios preliminares de fabricação de cordões lineares com o objetivo de avaliar parâmetros para identificar um *setup* de referência para três diâmetros de arame (1,2 mm, 1,0 mm e 0,8 mm) e, a partir deste, fabricar paredes metálicas compostas por 100 passes em cada ensaio, de modo a avaliar efeitos acumulativos térmicos e geométricos ao longo de múltiplas camadas. Para o arame de 1,2 mm adotaram-se inicialmente parâmetros base retirados da literatura técnica e das fichas do fabricante (tensão, corrente, modo de operação do arco, vazão de gás, velocidade de avanço do arame, DBCP, velocidade de deposição e sobreposição entre passes) como ponto de partida. A partir desses valores foi realizada uma otimização iterativa até alcançar um cordão considerado satisfatório quanto à continuidade, geometria e ausência de defeitos macroscopicamente visíveis, avaliando a evolução da seção transversal, a estabilidade do arco, a ocorrência de porosidade e respingos, bem como os efeitos do histórico térmico interpases. Posteriormente, repetiu-se o mesmo procedimento para o arame de 1,0 mm, que exigiu intensificação do número de ensaios devido à sensibilidade maior do processo a variações de corrente e velocidade. Por fim, adotou-se o arame de 0,8 mm, para o qual foram conduzidos mais testes experimentais.

Durante a primeira etapa experimental, a programação do manipulador foi realizada diretamente no controlador Yaskawa DX100, utilizando o *teach pendant* para o registro das posições iniciais e finais e escrevendo o programa na linguagem provida pelo controlador. O fluxo de trabalho consistiu-se em três etapas, iniciando com o ensino das posições de início e fim do cordão pelo *pendant* e definição do frame de trabalho e do TCP (*Tool Center Point*). Após, foi realizada a parametrização das variáveis de processo (velocidade linear do robô, incremento de altura por camada, tempo de estabilização do gás e número de repetições). E finalmente, implementou-se uma rotina iterativa que executa um laço de deposição com incremento vertical controlado entre camadas. A opção por programar diretamente no controlador DX100

foi adotada com o objetivo de simplificar o fluxo experimental e permitir ajustes rápidos de parâmetros durante os ensaios. Ao trabalhar no *teach pendant*, foi possível acessar e alterar setpoints em tempo real, testar variações e observar imediatamente os efeitos no cordão sem a necessidade de exportar, pós-processar e carregar programas externos, o que acelerou o ciclo de otimização.

O código desenvolvido no DX100 encontra-se apresentado a seguir. Ele foi estruturado de forma iterativa, permitindo repetir automaticamente a trajetória programada (seja uma parede reta ou o contorno de um aerofólio) até atingir o número desejado de passes.

```
0000 NOP
0001 CALL JOB:SOLDA-OFF
0002 0001 MOVL V=100 PL=0
0003 SET P102 P101
0004 CLEAR I017 1
0005 MOVJ VJ=10.00 PL=0
0006 CALL JOB:SOLDA-ON
0007 TIMER T=1.00
0008 *INICIO
0009 CALL JOB:MCASTRO
0010 ADD P102 P103
0011 SFTON P102
0012 INC I017
0013 JUMP *INICIO IF I017<=99
0014 CALL JOB:SOLDA-OFF
0015 0003 MOVJ V=100 PL=0
0016 END
```

Logo no início, a instrução NOP (0000) funciona como marca de início do programa. Em seguida, executa-se o comando CALL JOB:SOLDA-OFF, que garante que a tocha inicie com o arco desligado, evitando acionamentos indesejados durante o posicionamento. As linhas 0002 MOVL V=100 e 0005 MOVJ VJ=10 realizam movimentos rápidos e seguros até a posição inicial da trajetória. Antes do início do processo, o programa também define variáveis essenciais: a instrução SET P102 P101 atribui a P102 a posição inicial de altura da tocha (P101), garantindo que a primeira camada

seja depositada no plano base. A variável P102 representa sempre a altura atual da tocha no processo, sendo atualizada a cada camada. Em contrapartida, P101 contém a altura zero ou altura de referência sobre o substrato. A variável P103, por sua vez, armazena o incremento interpasse, ou seja, a distância vertical que deve ser somada após cada camada depositada para manter constante a distância bico-peça ao longo do crescimento da parede.

A variável I017 funciona como o contador de camadas. Inicialmente, ela é zerada pelo comando CLEAR I017 1, assegurando que o processo seja iniciado a partir da camada número um. Após o preparo inicial, o programa aciona o arco por meio do CALL JOB:SOLDA-ON, espera um segundo para estabilização do arco (TIMER T=1.00) e então entra no laço de repetição identificado por *INICIO.

Dentro do loop, é chamado o JOB:MCASTRO, que contém os movimentos específicos da trajetória a ser executada em cada camada. Esse arquivo é modular: pode conter tanto o código de uma parede linear quanto o contorno de um aerofólio. Assim, o programa principal funciona como um "executor de camadas", enquanto o JOB:MCASTRO descreve a geometria de uma única camada. Após a execução da trajetória, o comando ADD P102 P103 adiciona o incremento vertical à posição atual, ajustando a altura para a próxima camada. Em seguida, o comando SFTON P102 aplica um deslocamento (shift) ao sistema de coordenadas, movendo a próxima trajetória exatamente para a altura correspondente ao valor atualizado de P102.

A linha INC I017 incrementa o contador de camadas. O comando subsequente JUMP *INICIO IF I017<=99 implementa o loop completo, repetindo o processo enquanto I017 for menor ou igual ao número total de camadas (neste caso, 99), permitindo uma deposição totalmente automatizada. Quando a contagem atinge o limite programado, a execução sai do laço, realiza novamente o comando CALL JOB:SOLDA-OFF para desligar o arco e posiciona a tocha em segurança com MOVJ V=100, encerrando o programa (END).

Após cada deposição procedeu-se à medição da seção transversal do cordão (largura e altura) com paquímetro e à inspeção visual em busca de defeitos aparentes (gotejamentos, irregularidades de espessura, poros visíveis). Dessa forma, a seleção dos parâmetros de referência em cada diâmetro baseou-se em critérios qualitativos do cordão (continuidade, ausência de respingos excessivos, largura e altura compatíveis com o perfil desejado).

As variáveis de processo avaliadas e os critérios de ajuste foram:

- **Tensão do arco (V)** – ajustada para controlar a transferência de calor e a fluidez do metal de adição. Cordões altos e estreitos indicavam necessidade de aumento da tensão, enquanto cordões baixos e largos sugeriam redução.

- **Corrente (I)** – controla diretamente o aporte térmico e influencia a penetração, a largura e a altura do cordão. Correntes maiores tendem a aumentar penetração e altura e, se excessivas, provocam queima do arame e do substrato, enquanto correntes reduzidas diminuem a fusão e podem causar falta de união.
- **Velocidade de alimentação do arame (m/min)** – regulada para equilibrar a taxa de deposição com a velocidade de deslocamento. Ajustes finos na alimentação afetaram diretamente a altura e largura do cordão.
- **Velocidade de deslocamento da tocha (cm/min)** – regulada para equilibrar a taxa de deposição com a velocidade de alimentação. Fator crucial para controle da trajetória.
- **Vazão de gás (l/min)** – seu ajuste afeta diretamente a eficácia da proteção contra contaminação do ar, a estabilidade do arco e a ocorrência de porosidade.
- **Distância de bico-peça (DBCP)** – tem influencia sobre a estabilidade do arco e, por consequência, no método de transferência e na forma do cordão.
- **Modo de operação da fonte** – testou-se o modo modo curto-circuito e pulsado convencional e sinérgico. O arco pulsado foi avaliado por proporcionar maior estabilidade e menos respingos em comparação com o modo de curto-circuito e globular.
- **Incremento vertical entre cada passe** – incrementos menores tendem a aumentar a sobreposição e o aporte térmico local por unidade de área, favorecendo maior diluição e continuidade entre camadas, porém elevando o risco de acúmulo de calor, deformações e alterações microestruturais, enquanto incrementos maiores reduzem interação térmica entre camadas, o que pode diminuir diluição e melhorar controle dimensional, mas também aumentar a probabilidade de falta de fusão entre passes adjacentes.

Para cada alteração de parâmetro foi depositado um novo cordão mantendo as demais variáveis constantes, de modo a isolar o efeito de cada variável sobre a geometria e a qualidade do cordão. O processo iterativo cessou quando foram obtidos cordões regulares, sem penetração excessiva nem falta de fusão. Os parâmetros finais assim determinados foram então aplicados nas fases seguintes de produção dos protótipos de aerofólio.

3.2.2 Segunda etapa: avaliação de trajetórias

Para a segunda etapa, que investigou o efeito da trajetória robotizada na construção do perfil do aerofólio, foram utilizados os parâmetros definidos na etapa anterior. O

perfil NACA 2412 foi modelado de forma paramétrica no Autodesk Inventor e exportado em formato compatível com o fluxo de programação off-line. No ambiente RoboDK efetuou-se a importação da geometria, a geração das trajetórias de deposição e a simulação cinemática do manipulador, incluindo verificação de colisões e limites de alcance. Durante as simulações e nos ensaios experimentais reais variou-se, de modo sistemático, a velocidade linear do robô ao longo da curva (de forma uniforme e com perfis de aceleração/deceleração locais), com o objetivo de reduzir erros dimensionais entre o percurso teórico do aerofólio e a trajetória efetivamente depositada, bem como de minimizar defeitos resultantes de acelerações bruscas ou de inércia do conjunto tocha-alimentador.

Para a geração da geometria do aerofólio NACA 4 utilizou-se o repositório online Airfoil Tools (AIRFOIL TOOLS, 2025), onde foi selecionado o perfil desejado e exportada a tabela de coordenadas (formato x,y) disponibilizada pelo site. Essa tabela de pontos foi importada para uma planilha eletrônica, organizada e convertida para um formato compatível com o processo de modelagem (CSV), e submetida a verificações básicas de continuidade e ordem dos pontos (da borda de ataque à borda de fuga). Em seguida, os pontos tratados foram importados para o Autodesk Inventor e utilizados para construir um desenho por interpolação/spline que reproduz fielmente a curva do aerofólio. Foram aplicados ajustes de posicionamento, alinhamento e escala para assegurar que o perfil estivesse corretamente orientado no frame de referência da peça e compatível com o sistema de coordenadas do RoboDK. Esse fluxo permitiu obter uma curva paramétrica precisa e reproduzível, facilitando a exportação posterior da geometria para programação off-line e para a geração das trajetórias de deposição.

No ambiente do RoboDK, definiu-se o sistema de coordenadas do robô e posicionou-se o modelo do substrato e do aerofólio. As trajetórias de deposição foram criadas seguindo o contorno do aerofólio camada por camada. O RoboDK permitiu simular em 3D o movimento do robô, garantindo que não houvesse colisões entre o gancho, a tocha, o substrato e o próprio arco de soldagem. A simulação também validou o alcance e a orientação do robô em cada ponto, antecipando ajustes necessários nos caminhos ou na sequência de deposição. Ao final dessa etapa, gerou-se o programa de controle do robô com todas as posições e velocidades definidas para a deposição.

Para melhorar a uniformidade geométrica do cordão depositado, adotou-se variação de velocidade de deslocamento do robô ao longo do percurso de soldagem. Em regiões do aerofólio com curvaturas acentuadas (por exemplo, pontas de asa), aumentou-se a velocidade do robô, diminuindo o tempo de fusão local e evitando cordões muito largos. Em trechos retilíneos ou onde o aporte tendia a acumular, diminuiu-se a velocidade para compensar a maior deposição de material. Essa estratégia dinâmica foi implementada programando-se diferentes velocidades para segmentos distintos das trajetórias no RoboDK. Como resultado, obteve-se cordões de espessura

mais uniforme ao longo de cada camada, contribuindo para a precisão geométrica do protótipo final.

A construção do aerofólio foi executada camada a camada. Inicialmente depositou-se a primeira camada completa em torno do perfil do aerofólio, seguindo o desenho importado. Em seguida, o robô elevou-se verticalmente uma altura pré-fixada e repetiu a deposição do contorno, mantendo os mesmos parâmetros de soldagem. Cada camada sucessiva correspondeu a um cordão contínuo depositado sobre a anterior. Não houve preenchimento interno (o aerofólio foi construído apenas com contornos externos), nem paradas longas entre camadas. Essa estratégia garantiu sobreposição adequada entre camadas e crescimento estável do componente. O processo continuou até atingir a altura total prevista no projeto do protótipo.

Após a deposição completa, os protótipos foram avaliados segundo múltiplos critérios de qualidade, conforme práticas de soldagem:

- **Análise visual** – inspeção dos cordões e superfícies finais em busca de defeitos (poros, trincas, falta de fusão, inclusões). Registraram-se defeitos aparentes a olho nu, como irregularidades de cordão, respingos e cristas.
- **Avaliação dimensional** – mediram-se as dimensões do aerofólio (espessura e altura do perfil) com paquímetro e compararam-se ao modelo CAD de referência. Verificou-se o desvio geométrico e a precisão da forma em relação às especificações de projeto. Cordões uniformes resultaram em formas mais próximas das dimensões planejadas.
- **Estabilidade do arco** – durante a deposição monitorou-se qualitativamente o arco elétrico (ruídos, variações de brilho, incidentes de curto). Arcos estáveis, sem oscilações abruptas, indicam bom controle do processo.
- **Qualidade superficial** – verificou-se a rugosidade e acabamento dos cordões. Cordões regulares apresentaram superfícies lisas e homogêneas. Cordões com irregularidades (excesso de material, cristas) indicaram variações no aporte ou na penetração. A uniformidade do contorno do aerofólio, sem escamas ou sulcos, foi considerada como indicador de bom controle do processo.

Esses critérios de avaliação permitiram comparar as peças obtidas com diferentes condições experimentais e determinar a melhor combinação de parâmetros de soldagem (incluindo o diâmetro de arame) e estratégia de construção.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Otimização por diâmetro de arame

A seguir apresentam-se os resultados relativos à etapa de otimização iterativa realizada para cada diâmetro de arame. Para cada subtópico indica-se a matriz de parâmetros testados, indicadores qualitativos avaliados e a razão técnica que levou à escolha do setup final.

4.1.1 Diâmetro 1,2 mm modo pulsado sinérgico

A série realizada com arame de 1,2 mm em modo pulsado sinérgico GMAW foi concluída com sucesso na primeira tentativa, permitindo a construção de uma parede com 200 mm de comprimento composta por 100 passes sob as condições operacionais selecionadas. Nesta série, o ponto de partida foram valores-base extraídos da literatura técnica e das fichas do fabricante. O setup empregado foi o seguinte: corrente nominal setada em 70 A, distância bico-peça (DBCP) de 15 mm, velocidade de deposição de 120 cm/min, incremento interpasse (shift on) de 0,8 mm e vazão de argônio de 15 L/min. A Tabela 2 apresenta os parâmetros utilizados para a tentativa com arame 1,2 mm em modo pulsado sinérgico.

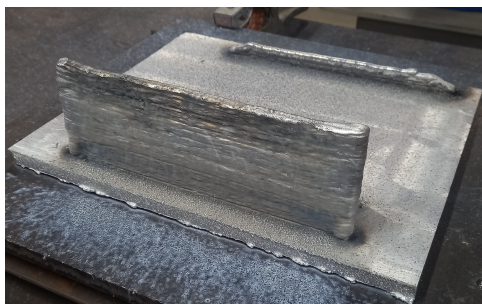
Tabela 2 – Parâmetros para tentativa com arame 1,2 mm em modo pulsado sinérgico

Tent.	Cor. (A)	DBCP (mm)	S.-on (mm)	Vaz. (L/min)	V. des. (cm/min)	Passes
1	70	15	0,8	15	120	100

Fonte: próprio autor.

A Figura 4 ilustra a continuidade e o aspecto macroscópico da parede construída, demonstrando boa coesão entre as camadas e ausência de falhas de alimentação visíveis.

Figura 4 – Parede fabricada com arame 1,2 mm em modo pulsado sinérgico



Fonte: próprio autor.

A Tabela 3 apresenta os valores médios medidos de corrente e tensão agrupados por blocos de 10 passes.

Tabela 3 – Médias de corrente e tensão por intervalos de passes para arame 1,2 mm em modo pulsado sinérgico

Passes	Média Corrente (I)	Média Tensão (V)
01-10	72,9	20,6
11-20	73,2	20,3
21-30	74,1	17,7
31-40	73,5	19,5
41-50	73,6	19,0
51-60	73,6	19,1
61-70	74,2	17,7
71-80	74,6	18,1
81-90	76,5	16,7
91-100	74,2	17,8

Fonte: próprio autor.

Analisando estatisticamente os dados medidos, obtém-se uma corrente média global de 74,0 A (desvio-padrão amostral de 1,0 A) e uma tensão média global de 18,7 V (desvio-padrão de 1,3 V). Esses resultados indicam que o sistema operou de maneira relativamente estável durante a construção completa. A variabilidade observada é compatível com a operação em modo pulsado sinérgico, em que pequenos ajustes automáticos de alimentação do arame e de corrente são esperados para manter o arco estável. Nota-se que a corrente média medida ficou ligeiramente acima do setpoint nominal (70 A), o que é compatível com o comportamento de fontes em modo sinérgico que ajustam automaticamente a velocidade de alimentação para manter a forma do arco conforme a tensão/setpoint.

Ao avaliar a tendência ao longo dos blocos de passes, observou-se uma redução linear média da tensão (-0,3 V por bloco). Essa tendência pode ser explicada por efeitos cumulativos do processo, tais como acúmulo térmico na peça (aumentando a fluidez da poça), variações na frequência de curto-circuito do ciclo pulsado e alterações na dinâmica de alimentação do arame pelo programa sinérgico. Em particular, quedas localizadas de tensão nos blocos 21–30 e 81–90 podem indicar alteração na extensão efetiva do arco (por exemplo, maior ocorrência de curtos) ou pequenos ajustes do controle sinérgico que aumentaram a velocidade de alimentação para suprir maior taxa de fusão. Apesar dessas flutuações, a amplitude dos desvios é moderada e não comprometeu a continuidade do cordão nem a conclusão da parede de 100 passes.

Do ponto de vista macroscópico, as medições dimensionais (largura e altura do cordão) apresentaram baixa dispersão entre repetições. Visualmente, a parede mostrou coerência geométrica e aderência entre camadas, com ocorrência reduzida de porosidade aparente à inspeção externa. Observou-se, no entanto, pequenas irregularidades superficiais e marcas de respingos pontuais, típicas de deposição por GMAW mesmo em modo pulsado.

Dessa forma, o setup adotado para o arame de 1,2 mm mostrou-se eficiente e reproduzível para a construção de paredes de 100 passes nas condições testadas. As variações observadas em tensão e corrente são consistentes com a operação em modo pulsado sinérgico e com efeitos térmicos interpasso.

4.1.2 Diâmetro 1,2 mm modo curto-circuito

Além da série de testes conduzidos no modo pulsado sinérgico, também foram realizados experimentos utilizando o modo curto-circuito (GMAW-S) para o arame de 1,2 mm. A decisão de investigar esse modo de operação teve duas motivações principais. Primeiro, o curto-circuito é reconhecido por produzir aporte térmico significativamente menor em comparação com o modo spray ou o pulsado, o que poderia mitigar o acúmulo térmico observado nas camadas superiores durante a deposição contínua. Segundo, este modo apresenta gotas menores e deposição mais controlada em velocidades de avanço reduzidas, o que, em teoria, poderia favorecer a construção de paredes estreitas e estáveis em alumínio, especialmente nas camadas iniciais. Assim, avaliou-se se o menor aporte térmico e a menor fluidez da poça poderiam contribuir para reduzir o empolamento e melhorar o controle dimensional da parede.

A primeira tentativa em modo curto-circuito foi realizada com os seguintes parâmetros: DBCP de 15 mm, vazão de 25 l/min, tensão de 20 V, velocidade de alimentação de 6 m/min e shift-on de 1,5 mm. Com essas condições foi possível construir 50 passes, como ilustrado na Figura 5.

Figura 5 – Parede fabricada na primeira tentativa com arame 1,2 mm em modo curto-circuito



Fonte: próprio autor.

Embora a progressão tenha sido contínua, a parede apresentou espessura excessiva, “tombamento” em direção ao lado de avanço da tocha e acabamento superficial irregular. Essa geometria é coerente com o comportamento típico do curto-circuito: o metal depositado possui maior viscosidade e menor fluidez, fazendo com que o cordão cresça mais lateralmente do que verticalmente. Além disso, com tensão alta para curto-circuito em alumínio, ocorre maior frequência de fusão parcial da gota, contribuindo para rebarbas laterais e irregularidade da parede.

Buscando reduzir o alargamento e melhorar a regularidade, ajustaram-se os parâmetros para tensão de 16 V, velocidade de alimentação de 4 m/min, DBCP de 11 mm e shift-on de 1,0 mm. Com essa nova configuração obteve-se novamente 50 passes, agora com acabamento superficial visivelmente superior e menor tendência ao tombamento, conforme a Figura 6.

Figura 6 – Parede fabricada na segunda tentativa com arame 1,2 mm em modo curto-circuito



Fonte: próprio autor.

Ainda assim, verificou-se abaulamento leve, especialmente nas camadas superiores. O abaulamento resulta da combinação entre menor fluidez do metal no modo curto-circuito e do acúmulo de calor no topo da parede. À medida que a peça aquece, a poça se espalha lateralmente e perde rigidez, fazendo com que o cordão se expanda mais para os lados.

Ao reduzir a tensão para 10,5 V, não foi possível realizar nenhum passe. Essa condição gerou arco extremamente instável, incapaz de romper a camada de óxido do alumínio. Tensões muito baixas no curto-circuito impedem a ionização adequada e reduzem drasticamente o tempo de arco aberto, fazendo com que o eletrodo “cole” repetidamente. Assim, a ausência de fusão é coerente com o limite inferior de tensão típico para alumínio, que é mais elevado do que em aços.

Dessa forma, foi adotada uma configuração intermediária com tensão de 14 V e shift-on de 1,7 mm. Com esses ajustes, foi possível construir uma parede completa com 100 passes, como mostrado na Figura 7. O aumento do shift-on compensou a tendência ao alargamento e evitou o contato da tocha com a parede em crescimento, problema observado em tentativas anteriores. Apesar disso, a parede apresentou acabamento superficial apenas moderado, com piora acentuada acima das camadas intermediárias.

Figura 7 – Parede fabricada na terceira tentativa com arame 1,2 mm em modo curto-circuito



Fonte: próprio autor.

Essa degradação progressiva é típica do modo curto-circuito em deposição multicamada de alumínio por acúmulo térmico, pois com o aumento da temperatura das camadas inferiores, o metal superior solidifica mais lentamente, resultando em maior espalhamento lateral e perda de definição. Além disso, a baixa energia deste modo ocasiona com que o arco permaneça pouco penetrante nas camadas superiores, onde a parede está mais quente e exige energia adicional para manter uma poça estável.

A Tabela 4 apresenta os parâmetros utilizados para as tentativas com arame 1,2 mm em modo curto-circuito.

Tabela 4 – Parâmetros para tentativas com arame 1,2 mm em modo curto-circuito

Tent.	Tens. (V)	DBCP (mm)	S.-on (mm)	Vaz. (L/min)	V. Alim. (m/min)	Passes
1	20	15	1,5	25	6	50
2	16	11	1,0	25	4	50
3	14	11	1,7	25	4	100

Fonte: próprio autor.

Os valores médios de corrente e tensão para os 100 passes da terceira tentativa (Tabela 5) revelam comportamento consistente com o regime de curto-circuito. A corrente média variou entre 61 e 73 A, enquanto a tensão manteve-se próxima de 14–15 V. Os aumentos de corrente observados nos blocos superiores (61–100) estão associados ao maior pré-aquecimento da parede, que reduz a resistência elétrica do material e facilita a fusão do arame. Em modo curto-circuito, a maior fluidez do banho metálico aumenta a frequência de curtos e reaberturas do arco, elevando a corrente

média. Esse comportamento é típico da deposição de alumínio em regime quente e contribui para a deterioração do acabamento nas camadas superiores.

Tabela 5 – Médias de corrente e tensão por intervalos de passes para arame 1,2 mm em modo curto-circuito

Passes	Média Corrente (I)	Média Tensão (V)
01–10	69,8	14,5
11–20	62,5	14,7
21–30	61,2	14,4
31–40	67,7	14,1
41–50	64,8	14,0
51–60	69,9	14,2
61–70	72,0	14,0
71–80	72,4	14,2
81–90	70,3	14,4
91–100	73,2	14,7

Fonte: próprio autor.

Assim, embora viável, o modo curto-circuito mostrou-se inferior ao pulsado sinérgico em termos de controle dimensional, estabilidade e qualidade superficial.

4.1.3 Diâmetro 1,0 mm

A otimização do processo para o arame de 1,0 mm exigiu um número maior de iterações quando comparada ao arame de 1,2 mm, devido à maior sensibilidade desse diâmetro às oscilações de corrente, instabilidades do arco e problemas de alimentação.

Na primeira tentativa, empregaram-se os mesmos parâmetros definidos para o arame de 1,2 mm, alterando-se apenas a vazão de gás para 30 L/min. Apesar do cordão inicial apresentar fusão adequada, a deposição pôde avançar apenas até o 12º passe, quando ocorreu a fusão do arame no bocal da tocha. Esse problema está associado ao excesso de calor no arame e à instabilidade da transferência metálica, típica quando correntes relativamente elevadas são aplicadas a arames de menor diâmetro.

Na segunda tentativa, a corrente foi reduzida para 65 A. Observou-se leve melhora na estabilidade do arco e na regularidade inicial do cordão, permitindo a construção de 28 passes. Entretanto, novamente ocorreu fusão do arame no bocal, indicando que a corrente ainda se encontrava acima da faixa ideal para esse diâmetro. Nessa condição, a transferência não atingiu estabilidade suficiente, apresentando oscilações e interrupções de fusão ao longo da trajetória.

A redução da corrente para 60 A, na tentativa subsequente, mostrou-se excessiva, pois não houve fusão adequada do arame e a poça não se formou, fazendo com

que o arame se dobrasse. Esse comportamento é típico quando a energia fornecida é insuficiente para romper a camada de óxido no alumínio e estabelecer arco estável.

A terceira tentativa, com corrente ajustada para 63 A, apresentou resultados significativamente superiores. Foi possível construir 45 passes com cordões visualmente uniformes nas camadas iniciais e média estabilidade de arco. Contudo, verificou-se degradação progressiva da qualidade nas camadas superiores, caracterizada por redução da estabilidade da poça e, eventualmente, interrupção completa do arco. Esses efeitos são atribuídos ao acúmulo térmico e à relação entre altura da parede e DBCP, que tende a aumentar conforme o componente cresce verticalmente.

As três tentativas principais realizadas e mostradas na Figura 8 evidenciam o processo de ajuste progressivo dos parâmetros de soldagem até atingir condições estáveis para a construção completa da parede com 45 passes.

Figura 8 – Paredes fabricadas na primeira, segunda e terceira tentativa com arame 1,0 mm



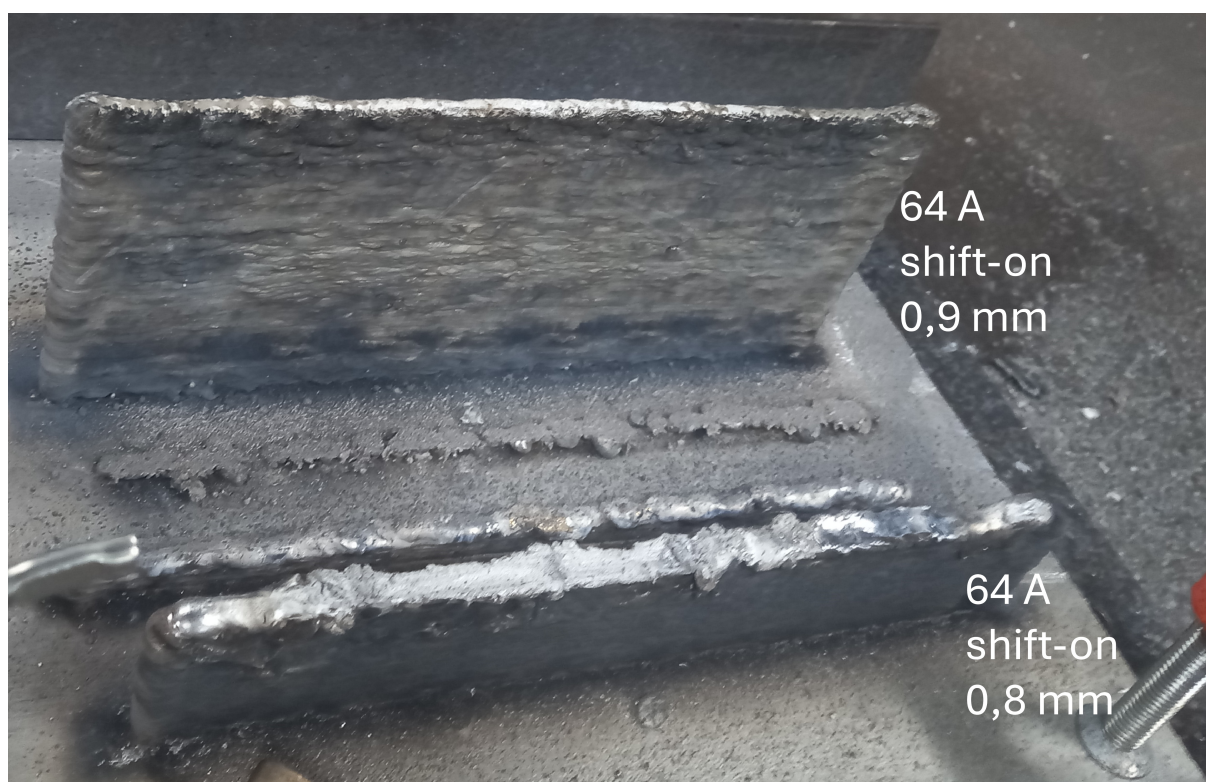
Fonte: próprio autor.

Na quarta tentativa, aumentou-se a corrente para 64 A a fim de melhorar a penetração e a estabilidade. Apesar de permitir 40 passes, observou-se que a tocha passou a tocar a poça em camadas superiores, evidenciando que o incremento vertical (shift-on) de 0,8 mm estava insuficiente. Esse contato físico entre bico de contato e cordão é típico quando a parede cresce mais do que o incremento programado, reduzindo artificialmente a DBCP e tornando o arco instável.

Buscando corrigir essa questão, o shift-on foi elevado para 1,2 mm, mas em todas as tentativas subsequentes a parede apresentou falhas prematuras devido ao excesso de incremento, que dificultou a sobreposição adequada entre camadas e prejudicou a fusão interpasse. Assim, adotou-se um valor intermediário de 0,9 mm.

Com o shift-on ajustado para 0,9 mm e corrente de referência próxima de 63–64 A, foi possível finalmente realizar a deposição completa dos 100 passes. Conforme apresentado na Figura 9, a parede construída apresentou bom aspecto visual, ausência de falta de fusão externa e estabilidade aceitável do arco durante a maior parte do processo, embora se mantenha a tendência de deterioração térmica nas camadas finais observada nos demais diâmetros.

Figura 9 – Paredes fabricadas na quarta e quinta tentativa com arame 1,0 mm



Fonte: próprio autor.

A Tabela 6 apresenta os parâmetros utilizados para as tentativas com arame 1,0 mm em modo pulsado sinérgico.

Tabela 6 – Parâmetros para tentativas com arame 1,0 mm em modo pulsado sinérgico

Ten.	Cor. (A)	DBCP (mm)	S.-on (mm)	Vaz. (L/min)	V. des. (cm/min)	Passes
1	70	15	0,8	30	120	12
2	65	15	0,8	30	120	28
3	63	15	0,8	30	120	45
4	64	15	0,8	30	120	40
5	64	15	0,9	30	120	100

Fonte: próprio autor.

A Tabela 7 apresenta as médias de corrente e tensão ao longo dos blocos de passes. Observa-se uma corrente média global de aproximadamente 60,4 A e uma tensão média de cerca de 18,6 V, valores compatíveis com operação estável em GMAW pulsado para arames finos de alumínio. A partir do bloco 41–50 nota-se aumento progressivo da corrente média, coerente com ajustes automáticos do modo sinérgico em resposta à mudança da DBCP conforme a parede cresce. Da mesma forma, a ligeira queda de tensão nos blocos finais (tendendo a 16 V) evidencia encurtamento natural do arco, típica consequência da aproximação física da tocha em função de pequenas variações geométricas acumuladas.

Tabela 7 – Médias de corrente e tensão por intervalos de passes para arame 1,0 mm

Passes	Média Corrente (I)	Média Tensão (V)
01–10	59,4	19,8
11–20	59,4	20,2
21–30	59,6	18,9
31–40	60,9	17,3
41–50	63,7	17,8
51–60	60,5	17,7
61–70	59,7	18,2
71–80	59,6	18,7
81–90	61,3	17,3
91–100	64,4	16,2

Fonte: próprio autor.

Do ponto de vista macroscópico, a parede final apresentou continuidade entre camadas e largura relativamente uniforme, sem ocorrência evidente de colapso de cordão ou empolamento severo. Pequenas irregularidades superficiais persistiram ao longo da altura, atribuíveis à alta sensibilidade térmica do alumínio 4043 e ao comportamento dinâmico do arco em arames de menor diâmetro. Ainda assim, os resultados foram considerados satisfatórios para progressão à próxima etapa.

4.1.4 Diâmetro 0,8 mm

A avaliação do arame de 0,8 mm apresentou os maiores desafios dentre todos os diâmetros testados. Desde as primeiras tentativas verificou-se que esse arame é extremamente sensível a pequenas variações no aporte térmico e na dinâmica do arco, mostrando comportamento marcadamente instável nas condições inicialmente propostas. Por essa razão, foi necessário explorar uma ampla faixa de parâmetros, incluindo alterações no modo de operação da fonte, na dinâmica do pulso e na distância bico-peça, sem que se atingisse estabilidade suficiente para construção de uma parede com 100 passes.

A primeira série de testes utilizou parâmetros próximos aos que haviam mostrado bom desempenho para o arame de 1,0 mm: vazão de gás de 25 L/min, incremento vertical (shift-on) de 0,9 mm, corrente de 64 A e DBCP de 15 mm. Contudo, diferentemente dos resultados anteriores, o cordão depositado tornou-se imediatamente globular e instável, o que inviabilizou a continuidade da deposição logo nos primeiros milímetros. Reduções sucessivas da corrente para 60 A, 56 A e 50 A também não produziram fusão adequada, resultando em formação de grandes gotas, interrupções de arco ou enrolamento do arame.

Diante dessa instabilidade precoce, passou-se a explorar a função a-x da fonte de soldagem, onde "a" representa o parâmetro que ajusta a dinâmica do arco, alterando a resposta da fonte frente às variações rápidas de tensão. Em fontes de GMAW pulsado, esse ajuste modifica o grau de "agressividade" ou "suavidade" da corrente durante eventos transitórios do arco: valores mais altos (ex.: a-70) tendem a produzir um arco mais rígido e energético, enquanto valores menores (ex.: a-15) resultam em um arco mais suave, porém menos eficiente em romper o óxido superficial do alumínio. Essa função é especialmente importante em arames finos, pois pequenas variações de comprimento do arco afetam drasticamente a transferência metálica.

Retornando à corrente de 64 A com ajuste dinâmico em a-70, observou-se pela primeira vez a possibilidade de iniciar a construção da parede, atingindo cerca de 20 passes (Figura 10). No entanto, a qualidade do cordão ainda era insuficiente: formou-se abundância de fuligem e o arco apresentou comportamento de "queima", típico de transferência instável, com forte oxidação da poça e respingos irregulares.

Figura 10 – Parede fabricada com configuração 64 A a-70 para arame 0,8 mm



Fonte: próprio autor.

Tentativas adicionais foram realizadas reduzindo a corrente para 62 A em diferentes níveis de ajuste dinâmico (a-70 e a-60), além de testes com 60 A em a-65. Em todos os casos, o processo não ultrapassou cinco passes, sempre apresentando fuligem intensa, cordões mal formados e interrupções do arco. A instabilidade era recorrente e manifestava-se tanto na transferência globular quanto na ausência de fusão consistente.

Na sequência, foram testadas combinações adicionais, incluindo 62 A em a-65 (que resultou em enrolamento do arame) e em a-35, além de 58 A em a-35 (com curtos sucessivos) e 58 A em a-15 (com transferência extremamente globular), como ilustrado na Figura 11. Nenhuma dessas condições mostrou qualquer viabilidade geométrica ou operacional.

Figura 11 – Paredes fabricadas com diferentes configurações para arame 0,8 mm



Fonte: próprio autor.

A Tabela 8 apresenta os parâmetros utilizados para as tentativas com arame 0,8 mm em modo pulsado sinérgico.

Tabela 8 – Parâmetros para tentativas com arame 0,8 mm em modo pulsado sinérgico

Ten.	Cor. (A)	DBCP (mm)	S.-on (mm)	Vaz. (L/min)	V. des. (cm/min)	Passes
1	64	15	0,9	25	120	3
2	64 a-70	15	0,9	25	120	20
3	62 a-70	15	0,9	25	120	3
4	62 a-60	15	0,9	25	120	4
5	60 a-65	15	0,9	25	120	5
6	62 a-65	15	0,9	25	120	2
7	62 a-35	15	0,9	25	120	3
8	58 a-35	15	0,9	25	120	4
9	58 a-15	15	0,9	25	120	2

Fonte: próprio autor.

Diante dos resultados insatisfatórios, optou-se por abandonar o modo pulsado sinérgico e migrar para o modo pulsado convencional, a fim de permitir controle manual dos parâmetros fundamentais do pulso (correntes e tempos), ampliando o espaço de otimização. No modo sinérgico, a fonte ajusta automaticamente a velocidade de alimentação, corrente e tensão de acordo com uma linha sinérgica predefinida para cada diâmetro de arame. Trata-se de um modo eficiente e estável quando o diâmetro é compatível com a linha sinérgica disponível, mas que se torna pouco flexível quando há incompatibilidade entre o comportamento do arco e o programa pré-definido, como no presente caso, em que o arame de 0,8 mm não encontrava faixa estável dentro da sinergia.

No modo pulsado convencional, portanto, foram adotados como ponto inicial parâmetros médios observados nas tentativas anteriores: corrente de pico $I_p = 175$ A, corrente de base $I_b = 50$ A, tempo de pico $t_p = 0,0045$ s, tempo de base $t_b = 0,025$ s e velocidade de alimentação de 7 m/min. Todas as tentativas mantiveram velocidade de avanço constante em 120 cm/min, vazão de gás constante em 25 L/min e shift-on constante em 0,9 mm. As primeiras deposições permaneceram altamente globulares e com formação abundante de fuligem. A alteração da DBCP para 22 mm não trouxe melhora significativa, indicando que a instabilidade não estava relacionada apenas à extensão do eletrodo.

Reduziu-se então o tempo de pico para $t_p = 0,0035$ s, mantendo $t_b = 0,025$ s, mas o cordão continuou irregular, com transferência incompleta e elevada oxidação. Somente após aumentar a corrente de pico para 190 A, reduzir a corrente de base para 30 A, diminuir o tempo de pico para 0,003 s e adotar tempo de base $t_b = 0,010$ s, foi possível formar um cordão contínuo com cerca de 15 passes (Figura 12). Ainda assim, a geometria permaneceu irregular, com depósitos incompletos e variações abruptas de

largura e altura.

Figura 12 – Parede fabricada em modo pulsado convencional para arame 0,8 mm



Fonte: próprio autor.

A Tabela 9 apresenta os parâmetros utilizados para as tentativas com arame 0,8 mm em modo pulsado convencional.

Tabela 9 – Parâmetros para tentativas com arame 0,8 mm em modo pulsado convencional

Ten.	I_p (A)	I_b (A)	t_p (s)	t_b (s)	DBCP (mm)	V. alim (m/min)	Passes
1	175	50	0.0045	0.025	15	7	3
2	175	50	0.0045	0.025	22	7	4
3	175	50	0.0035	0.025	22	7	3
4	190	30	0.0030	0.010	22	7	15

Fonte: próprio autor.

Algumas tentativas subsequentes foram executadas variando-se o balanço térmico do ciclo pulsado, utilizando a relação:

$$I_{\text{médio}} = \frac{I_p t_p + I_b t_b}{t_p + t_b} \quad (1)$$

Essa expressão define a corrente média resultante do regime pulsado e, consequentemente, o aporte térmico efetivo por unidade de tempo. Embora a variação do balanço térmico permita ajustar de forma precisa a energia entregue à poça de fusão, nenhuma das combinações avaliadas apresentou melhoria significativa na estabilidade do arco ou na geometria do cordão.

Diante do grande número de tentativas, do elevado consumo de material e da ausência de condições reprodutíveis para deposição contínua, concluiu-se que o arame de 0,8 mm não apresenta viabilidade prática para a manufatura aditiva por deposição a arco nas condições investigadas. Esse diâmetro mostrou-se demasiadamente sensível às variações térmicas e à dinâmica do arco, não permitindo estabelecer regime estável para construção de paredes com múltiplos passes, ao contrário dos diâmetros de 1,2 mm e 1,0 mm.

4.2 Otimização de trajetórias

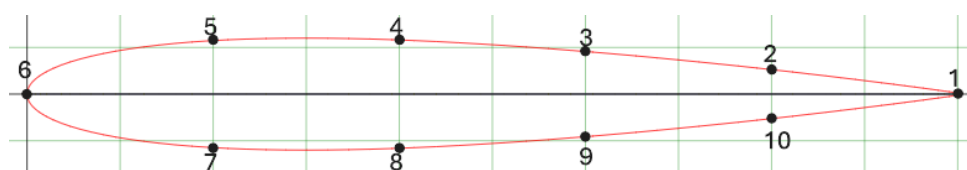
Após a análise comparativa dos três diâmetros de arame avaliados, constatou-se que o arame de 1,2 mm apresentava o melhor equilíbrio entre estabilidade do arco, regularidade geométrica e robustez do processo. Esse diâmetro forneceu paredes estáveis com 100 passes, com bom acabamento superficial, menor sensibilidade térmica e necessidade reduzida de ajustes finos quando comparado aos diâmetros de 1,0 mm e 0,8 mm. Em particular, o arame de 1,2 mm demonstrou ampla janela operacional, permitindo ajustes de tensão, velocidade de alimentação e DBCP sem perda significativa de estabilidade, o que o tornou o candidato mais adequado para a construção dos protótipos de aerofólios.

Embora o modo pulsado sinérgico tenha apresentado excelente qualidade nas paredes lineares, optou-se por seguir com o modo curto-circuito para a fabricação dos modelos. Essa decisão baseou-se em razões práticas e experimentais: durante os testes preliminares de trajetória, verificou-se que este modo oferecia maior resiliência a variações de velocidade ao longo da geometria do perfil e maior controle do aporte térmico em regiões críticas, como o bordo de ataque e o bordo de fuga. Além disso, o regime de baixa energia do curto-circuito mostrou-se vantajoso para realizar transições bruscas de direção, como as que ocorrem entre os pontos de referência do aerofólio, reduzindo o risco de colapso da parede ou escoamento excessivo da poça. Mesmo com acabamento inferior ao do pulsado, o curto-circuito ofereceu maior previsibilidade em trajetórias fechadas e complexas, motivo pelo qual foi selecionado para essa etapa.

4.2.1 Segmentação da trajetória e definição das velocidades

O aerofólio escolhido (perfil NACA 2412) foi segmentado em dez seções ao longo da corda, conforme ilustrado na Figura 13. A ideia central foi ajustar a velocidade de deslocamento da tocha em cada trecho, compensando automaticamente as diferenças geométricas ao longo do contorno. Regiões de elevada curvatura, como o bordo de ataque e o bordo de fuga, requerem V_{des} menores para garantir melhor controle da poça e evitar sobredeposição. Em contraste, trechos mais retilíneos permitem V_{des} superiores, reduzindo o aporte térmico acumulado e prevenindo acúmulo excessivo de material.

Figura 13 – Segmentação do perfil NACA 2412 em 10 pontos para definição das V_{des}



Fonte: próprio autor.

Nessa fase, buscou-se construir modelos reduzidos, com corda de 100 mm e 30 camadas, a fim de aperfeiçoar o controle de deposição antes da construção final.

Os parâmetros de referência adotados foram equivalentes à parede construída no modo curto-circuito com o arame de 1,2 mm: V_{des} inicial de 120 cm/min (20 mm/s), V_{des} reduzida nas regiões retas de 80 cm/min (13,33 mm/s), V_{alim} de 4 m/min, tensão de 14 V, shift-on de 0,85 mm, DBCP de 11 mm e vazão de gás de 30 L/min. A Tabela 10 apresenta os parâmetros utilizados para a tentativa com arame 1,2 mm em modo pulsado sinérgico.

Tabela 10 – Parâmetros para construção dos perfis de aerofólio

Tensão (V)	DBCP (mm)	Shift-on (mm)	Vazão (L/min)	V. Alim (m/min)
14	11	0,85	30	4

Fonte: próprio autor.

A primeira tentativa está ilustrada na Figura 14. Observou-se redução da altura na região compreendida entre os pontos 4 e 7, situada próxima ao bordo de ataque. Esse afinamento indica deposição insuficiente, causada pelo uso de uma V_{des} excessivamente elevada em uma região de geometria curva. Por outro lado, verificou-se excesso de deposição no bordo de fuga (entre os pontos 10 e 2), sugerindo necessidade de aumentar a V_{des} nessa região para reduzir o aporte térmico. Tais observações reforçaram a necessidade de ajustes localizados nas velocidades de deslocamento.

Figura 14 – Perfil fabricado na primeira tentativa para otimização de trajetória



Fonte: próprio autor.

Na segunda tentativa, buscou-se corrigir os problemas anteriores, reduzindo a V_{des} para 80 cm/min no bordo de ataque (entre os pontos 5 e 7) e aumentando a V_{des} na região do bordo de fuga para 180 cm/min (30 mm/s) entre os pontos 10 e 2. O resultado (Figura 15) mostrou melhora significativa tanto na regularidade da espessura quanto na distribuição volumétrica. Contudo, surgiu um novo problema: a transição súbita de velocidade de deslocamento entre 80 cm/min e 180 cm/min (após o ponto

10) ocasionou interrupções do arco, resultando em pequenas falhas de deposição. Essa interrupção é típica em modo curto-circuito quando há variações abruptas da velocidade, que alteram instantaneamente a carga elétrica e, portanto, desestabilizam o arco.

Figura 15 – Perfil fabricado na segunda tentativa para otimização de trajetória



Fonte: próprio autor.

Na terceira tentativa (Figura 16), adotou-se uma abordagem mais progressiva, definindo uma V_{des} constante de 120 cm/min na maior parte da trajetória, com redução gradual no bordo de ataque: 108 cm/min no ponto 7, 96 cm/min no ponto 8 e 84 cm/min no ponto 9.

Figura 16 – Perfil fabricado na terceira tentativa para otimização de trajetória



Fonte: próprio autor.

Esse ajuste incremental reduziu a ocorrência de interrupções do arco e aumentou a uniformidade da parede, embora o perfil ainda apresentasse irregularidades perceptíveis na distribuição de altura ao longo da corda. A menor velocidade nos pontos mais curvos ajudou a preencher adequadamente o bordo de ataque, mas o bordo de fuga continuou sujeito a espessamentos.

Foram realizados testes adicionais buscando ajustar a velocidade de alimentação, mas não foram observadas melhorias relevantes, mantendo-se o valor de 4 m/min.

4.2.2 Abordagem baseada na medição de altura

Diante da persistência de pequenas irregularidades, uma nova estratégia foi adotada nas tentativas 4, 5 e 6 (Figura 17), fundamentada em uma lógica de normalização da altura construída ao longo dos trechos do perfil.

Figura 17 – Perfis fabricados na quarta, quinta e sexta tentativas para otimização de trajetória



Fonte: próprio autor.

Na quarta tentativa, fabricou-se um modelo com V_{des} uniforme de 120 cm/min, que serviu de referência. As alturas resultantes foram medidas ponto a ponto. Em seguida, para a tentativa 5, considerou-se a maior altura obtida como valor de referência (40 mm). Para cada trecho, calculou-se o percentual relativo da altura (ex.: 35 mm = 87,5% da altura máxima). Dessa forma, as velocidades de deslocamento foram reduzidas proporcionalmente ao déficit de altura: trechos que apresentaram menor altura receberam velocidades proporcionalmente reduzidas, a fim de aumentar o tempo de permanência da tocha e, conseqüentemente, o volume depositado. Por exemplo, para um trecho cuja altura era 87,5% da máxima, a V_{des} foi ajustada para 87,5% de 120 cm/min = 105 cm/min. Essa lógica baseou-se no princípio de que a deposição volumétrica no curto-circuito é aproximadamente inversamente proporcional à velocidade de deslocamento para parâmetros de corrente e alimentação fixos.

A tentativa 5 resultou em melhora substancial da uniformidade. A tentativa 6 aplicou o mesmo procedimento com pequenos refinamentos nos percentuais, gerando o melhor perfil dentre todos os ensaios, com geometria bem definida e distribuição

consistente ao longo de toda a corda. Os valores completos de V_{des} para cada tentativa encontram-se na Tabela 11.

Tabela 11 – V_{des} (cm/min) em cada ponto da trajetória para cada tentativa

Tentativa x Pontos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	120	80	80	80	120	120	80	80	80	120
2	180	80	80	80	80	80	80	80	80	180
3	120	120	120	120	120	120	108	96	84	84
4	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120
5	120	120	105	99	93	93	93	93	105	120
6	20	105	99	93	108	108	90	87	78	120

Fonte: próprio autor.

Definido um conjunto satisfatório de velocidades e parâmetros, procedeu-se à fabricação do protótipo final em escala ampliada, com corda de 200 mm e 350 camadas. Para evitar acúmulo térmico excessivo, característico de processos MADA em geometrias fechadas, foi realizada uma parada a cada 50 passes, permitindo resfriamento natural da peça e inspeção intermediária. Esse procedimento minimiza distorções, controla deformações e reduz a instabilidade do arco associada a paredes quentes.

Após a conclusão da deposição, o modelo foi usinado para remoção das irregularidades superficiais e obtenção do perfil final. A Figura 18 apresenta o protótipo acabado, com geometria final consistente com o modelo projetado.

Figura 18 – Modelo final de aerofólio fabricado



Fonte: próprio autor.

4.3 Discussão

Os resultados obtidos nas etapas de otimização por diâmetro de arame e de definição de trajetórias evidenciam a forte influência conjunta do comportamento térmico, da estabilidade do arco e da dinâmica de fusão da liga ER4043 sobre a geometria final das peças fabricadas por MADA. De forma geral, observou-se que o desempenho dos diferentes diâmetros avaliados e das estratégias de percurso está alinhado aos mecanismos descritos pela literatura para processos MADA com ligas Al-Si.

O arame de 1,2 mm apresentou as deposições mais estáveis entre os parâmetros testados, resultando em paredes contínuas, com boa fusão entre camadas e sem interrupções do arco. Esse desempenho está relacionado à maior taxa de fusão proporcionada pelo diâmetro mais robusto, que melhora a estabilidade térmica e favorece uma alimentação contínua do arame. Estudos sobre o comportamento das ligas Al-Si mostram que seu metal fundido apresenta elevada fluidez, especialmente em composições com aproximadamente 5% de silício, como a ER4043 (ZHANG et al., 2022). Quando o volume depositado por unidade de comprimento é muito reduzido, situação típica de arames mais finos, essa alta fluidez pode acentuar a instabilidade da poça de fusão, dificultando sua sustentação e levando a oscilações do arco. Assim, os resultados obtidos com o arame de 1,2 mm confirmam que a maior seção transversal favorece um regime de fusão mais estável, reduzindo variações no arco e minimizando interrupções na transferência metálica.

Em contraste, o arame de 1,0 mm mostrou maior sensibilidade às variações de velocidade e corrente, exigindo maior número de ajustes para se obter deposições satisfatórias. A instabilidade observada, como cordões estreitos, interrupções ocasionais e variações de altura, é coerente com o comportamento descrito por Wahsh et al. (2018), segundo os quais pequenas alterações de tensão e alimentação provocam mudanças significativas na geometria do cordão no alumínio. Como a fonte sinérgica ajusta automaticamente a velocidade do fio ao aumento da tensão, o processo torna-se mais suscetível a flutuações quando o volume depositado é menor. Assim, a instabilidade obtida com o arame de 1,0 mm é compatível com os efeitos de aporte térmico reduzido e poça de fusão menos robusta.

O arame de 0,8 mm, por sua vez, mostrou-se inviável nas condições avaliadas, apresentando instabilidade extrema do arco, interrupções frequentes e cordões descontínuos mesmo após múltiplas tentativas de ajuste. Essa resposta é coerente com a literatura sobre MADA em alumínio, que aponta que arames muito finos tendem a operar próximos ao limite inferior de corrente para fusão estável, intensificando respingos, falta de fusão e formação de defeitos longitudinais (WAHSH et al., 2018; GIERTH et al., 2020). A menor inércia térmica do arame e a maior sensibilidade a pequenas

variações na alimentação resultaram, experimentalmente, em instabilidade que inviabilizou a construção de paredes multicamadas. Portanto, os resultados confirmam que diâmetros muito reduzidos não são adequados para MADA com ligas Al-Si, ao menos nas faixas de tensão e velocidade empregadas.

Quanto à análise de deposição multicamada, os resultados obtidos com o arame de 1,2 mm demonstraram o efeito típico do acúmulo de calor ao longo dos passes superiores, evidenciado pelo aumento gradual da altura do cordão e da fluidez do metal fundido. Esse comportamento está de acordo com a descrição de Ding et al. (2014), segundo a qual a redução da taxa de solidificação nas camadas superiores favorece maior espalhamento do banho metálico e aumento da largura do cordão. Ao mesmo tempo, o efeito de empolamento observado em algumas regiões pode ser entendido à luz do mecanismo apontado por Kozamernik, Bracun e Klobcar (2020), que relacionam o fenômeno ao desequilíbrio entre aporte térmico excessivo e suporte insuficiente das camadas inferiores ainda quentes. O fato de esse comportamento surgir apenas após dezenas de camadas reforça a importância de estratégias de controle térmico, como temperatura interpasse ou resfriamento ativo, para deposições mais longas.

No que se refere à otimização das trajetórias, a variação local da velocidade de deslocamento ao longo do perfil NACA 2412 mostrou-se essencial para manter a regularidade geométrica. Observou-se que regiões de alta curvatura, especialmente no bordo de ataque e no bordo de fuga, exigiram velocidades menores, enquanto trechos mais retos permitiram velocidades maiores sem perda de definição. Esses pontos estão alinhados com a literatura sobre controle de percurso em MADA, que destaca que o balanço entre velocidade de deslocamento e taxa de deposição determina diretamente o volume metálico acumulado por unidade de comprimento (DING et al., 2014). Ao reduzir a velocidade em regiões curvas, aumenta-se o tempo de residência da poça de fusão e, conseqüentemente, a largura do cordão, compensando o risco de formação de descontinuidades ou falhas de aderência. Da mesma forma, aumentar a velocidade em trechos retilíneos reduz o aporte térmico excessivo e evita empolamentos locais.

5 CONCLUSÕES

A análise experimental realizada neste trabalho permitiu avaliar de forma sistemática a influência do diâmetro do arame e da estratégia de trajetória na fabricação de protótipos de aerofólios de alumínio por Manufatura Aditiva por Deposição à Arco (MADA). Os resultados evidenciaram que tanto o comportamento térmico quanto a estabilidade do arco exercem papel determinante na qualidade geométrica das camadas depositadas, especialmente quando se trata de ligas de alumínio da classe ER4043, cuja alta condutividade térmica e formação rápida de óxidos tornam o processo intrinsecamente sensível a variações de parâmetros.

A primeira etapa permitiu identificar diferenças significativas entre os três diâmetros avaliados (1,2 mm, 1,0 mm e 0,8 mm). O arame de 1,2 mm apresentou a maior robustez operacional, permitindo a construção de paredes com 100 passes tanto em modo pulsado sinérgico quanto em modo curto-circuito, com boa regularidade e baixa incidência de instabilidades. O arame de 1,0 mm demonstrou viabilidade condicionada a ajustes finos de corrente, DBCP e incremento vertical, mostrando-se mais suscetível ao acúmulo térmico e à redução da estabilidade do arco ao longo das camadas superiores. Já o arame de 0,8 mm mostrou-se inadequado para aplicação em MADA nas condições investigadas, apresentando comportamento altamente globular, intensa oxidação e incapacidade de manter transferência metálica estável, mesmo após ampla variação de parâmetros e testes em modo pulsado convencional e sinérgico. Assim, conclui-se que o diâmetro de 1,2 mm é o mais adequado para a deposição multicamada em alumínio 4043, conciliando taxa de deposição, estabilidade de arco e qualidade geométrica.

A segunda etapa demonstrou que a geometria do aerofólio impõe desafios específicos à dinâmica do arco e à deposição do material, exigindo controle preciso da velocidade de deslocamento do robô. As primeiras tentativas evidenciaram que a utilização de uma velocidade constante ao longo do contorno do perfil resulta em variações significativas na altura das camadas, especialmente em regiões de curvatura acentuada, como o bordo de ataque e o bordo de fuga. A estratégia de segmentação do aerofólio em pontos discretos e a aplicação de diferentes velocidades por trecho permitiram suavizar essas variações, embora transições abruptas entre velocidades tenham provocado interrupções do arco em determinadas tentativas.

A adoção de uma abordagem baseada na normalização da altura construída, utilizando o perfil fabricado como referência para redistribuição das velocidades, mostrou-se a solução mais eficiente. Esse método permitiu compensar déficits locais de deposição e conduziu à obtenção de um protótipo de aerofólio com distribuição geométrica mais uniforme, estabelecendo uma relação direta entre altura obtida, aporte térmico e velocidade linear do robô. O modelo final, fabricado com corda ampliada e maior

número de camadas, confirmou a eficácia da estratégia adotada.

De modo geral, os resultados comprovam que a fabricação de perfis aerodinâmicos em alumínio via MADA é tecnicamente viável, desde que haja controle rigoroso dos parâmetros térmicos, adequada seleção do diâmetro do arame e definição criteriosa das trajetórias de deposição. A integração entre modelagem CAD, simulação robótica e ajustes iterativos de velocidade demonstrou ser um caminho eficiente para compatibilizar as limitações do processo com a geometria complexa do aerofólio. Assim, o trabalho fornece subsídios experimentais e metodológicos para futuros estudos envolvendo a fabricação de componentes aeronáuticos por MADA, evidenciando o potencial desse processo para aplicações industriais que demandam flexibilidade geométrica, baixo custo e elevada taxa de deposição.

5.1 Trabalhos futuros

A realização deste estudo evidenciou o potencial da MADA para a fabricação de geometrias aerodinâmicas em alumínio, mas também revelou limitações inerentes ao processo que abrem espaço para o desenvolvimento de investigações complementares. Nesse sentido, diversos temas podem ser explorados em trabalhos futuros, com vistas ao aprofundamento da compreensão do comportamento do processo, ao aperfeiçoamento dos parâmetros e ao avanço da aplicação industrial da técnica.

Uma primeira continuidade relevante consiste na análise metalúrgica detalhada das peças fabricadas, incluindo a investigação microestrutural por microscopia óptica ou eletrônica, a quantificação de porosidade e a identificação de tensões residuais ao longo das camadas. A caracterização físico-metalúrgica permitiria relacionar os fenômenos térmicos observados, como empolamento, variação da fluidez da poça e instabilidade das camadas superiores, com a evolução da microestrutura e da morfologia de solidificação do alumínio ER4043. Ensaio mecânicos de tração, dureza e fadiga também poderiam contribuir para avaliar o desempenho estrutural das peças produzidas, especialmente em aplicações aeronáuticas.

Outro desdobramento promissor está no estudo de estratégias avançadas de controle térmico, como o uso de arrefecimento forçado, resfriamento ativo da tocha, monitoramento da temperatura interpasse ou integração de sensores infravermelhos acoplados ao sistema robótico. Tais abordagens poderiam mitigar o acúmulo térmico que compromete a estabilidade do arco em deposições contínuas e reduzir a distorção acumulada ao longo das camadas superiores, ampliando a janela operacional para a fabricação de geometrias complexas.

Além disso, recomenda-se a investigação de diferentes ligas de alumínio e de metais de adição alternativos, como ER5356 ou ligas com refinadores de grão,

que possam proporcionar microestruturas mais estáveis e menor suscetibilidade à porosidade. A comparação entre diferentes ligas permitiria estabelecer critérios de seleção mais precisos para a fabricação de perfis aerodinâmicos e componentes estruturais por MADA.

No âmbito da programação robótica, estudos futuros podem explorar algoritmos automáticos de ajuste de velocidade baseados em feedback geométrico, aprendizado de máquina ou simulação térmica preditiva. A criação de uma plataforma integrada CAD–CAM–Robótica com ajustes dinâmicos de trajetória permitiria compensar variações indesejadas ainda durante o processo de deposição, reduzindo falhas e melhorando a precisão dimensional do modelo final.

Por fim, recomenda-se o aprofundamento da manufatura de aerofólios em escala real, incluindo o preenchimento interno com padrões específicos de deposição, o uso de múltiplos passes para reforço estrutural e a análise do comportamento aerodinâmico das peças construídas após acabamento superficial. Tais estudos contribuiriam para consolidar a MADA como alternativa viável na produção de componentes aeronáuticos que requerem resistência mecânica, redução de massa e liberdade geométrica.

Assim, os trabalhos futuros propostos constituem caminhos naturais de evolução para esta pesquisa e podem ampliar significativamente a aplicabilidade da MADA no setor aeronáutico e na engenharia de estruturas metálicas avançadas.

REFERÊNCIAS

ABNT NBR ISO/ASTM 52900. *Additive manufacturing — General principles — Fundamentals and vocabulary*. Geneva, CH / West Conshohocken, PA, USA / Rio de Janeiro, BR, 2025. Adoptada como norma brasileira NBR ISO/ASTM 52900. Citado na página 17.

AIRFOIL TOOLS. *Airfoil Tools — Airfoil Data and Tools*. 2025. <<http://airfoiltools.com>>. Disponível em: <<http://airfoiltools.com>>. Acesso em: 21 out. 2025. Citado na página 35.

AMERICAN WELDING SOCIETY. *AWS A5.10/A5.10M — Specification for Aluminum and Aluminum-Alloy Welding Filler Metals*. 1999. Reapproved 2007. Disponível em: <https://pubs.aws.org/Download_PDFS/A5.10-A5.10M-1999%28R2007%29PV.pdf>. Citado na página 23.

DAVIS, J. R. *Aluminum and Aluminum Alloys*. ASM International, 2001. pp. 351–416 p. Disponível em: <<https://materialsdata.nist.gov/bitstream/handle/11115/173/Aluminum%20and%20Aluminum%20Alloys%20Davis.pdf>>. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 25.

DING, D. et al. A tool-path generation strategy for wire and arc additive manufacturing. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 73, n. 1–4, p. 173–183, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00170-014-5808-5>>. Citado 3 vezes nas páginas 23, 26 e 57.

ESAB. Guide / Manual, *MIG Welding Guide: Process, Parameters, and Best Practices*. 2025. PDF/Online. Disponível em: <https://esab.com>. Acesso em: 06 set. 2025. Citado na página 22.

GIERTH, M. et al. Wire arc additive manufacturing (waam) of aluminum alloy almg5mn with energy-reduced gas metal arc welding (gmaw). *Materials*, v. 13, n. 12, p. 2671, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/ma13122671>>. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 56.

KOZAMERNIK, N.; BRACUN, D.; KLOBCAR, D. Waam system with interpass temperature control and forced cooling for near-net-shape printing of small metal components. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 110, n. 7–8, p. 1955–1968, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00170-020-05958-8>>. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 57.

MESSLER ROBERT W., J. *Principles of Welding: Processes, Physics, Chemistry, and Metallurgy*. New York: John Wiley & Sons, 1999. ISBN 0471253766. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 23.

MILLER ELECTRIC. *Guidelines for Gas Metal Arc Welding (GMAW)*. 2013. PDF/Online. Disponível em: <https://www.millerwelds.com>. Acesso em: 05 set. 2025. Citado na página 22.

NGO, T. et al. Additive manufacturing (3d printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B Engineering*, v. 143, 02 2018. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 19.

RODRIGUES, T. A. et al. Current status and perspectives on wire and arc additive manufacturing (waam). *Materials*, v. 12, n. 7, 2019. ISSN 1996-1944. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1996-1944/12/7/1121>>. Citado 3 vezes nas páginas 14, 19 e 20.

SARIKAYA, M. et al. A review on aluminum alloys produced by wire arc additive manufacturing (waam): Applications, benefits, challenges and future trends. *Journal of Materials Research and Technology*, v. 33, p. 5643–5670, 2024. ISSN 2238-7854. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2238785424024839>>. Citado na página 20.

TEIXEIRA, F. R. et al. A methodology for shielding-gas selection in wire arc additive manufacturing with stainless steel. *Materials*, v. 17, n. 13, p. 3328, 2024. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/ma17133328>>. Citado na página 21.

TOYSERKANI, E. et al. *Metal Additive Manufacturing*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2021. Also available in Adobe PDF (ISBN: 9781119210849) and EPUB (ISBN: 9781119210832). ISBN 9781119210788. Disponível em: <<https://lccn.loc.gov/2021028894>>. Citado na página 17.

WAHSH, L. M. et al. Parameter selection for wire arc additive manufacturing (waam) process. In: *Contributed Papers from Materials Science & Technology 2018 (MS&T18)*. Columbus, OH: [s.n.], 2018. Disponível em: <https://www.tms.org/membercontent/pdf2/mst_2018_78_85.pdf>. Citado 5 vezes nas páginas 15, 25, 26, 27 e 56.

WEMAN, K. *Welding Processes Handbook*. Cambridge: Woodhead Publishing, 2003. ISBN 1855736360. Citado na página 22.

ZHAI, W. et al. Wire arc additive manufacturing of er70s-6/s355 bimetal component. *Materials Science and Engineering: A*, Elsevier, v. 900, p. 146498, 2024. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 19.

ZHANG, X. et al. Effects of si and sr elements on solidification microstructure and thermal conductivity of al–si-based alloys. *Journal of Materials Science*, v. 57, n. 11, p. 6428–6444, 2022. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 56.

ZHOU, L. et al. Additive manufacturing: A comprehensive review. *Sensors*, v. 24, n. 9, 2024. ISSN 1424-8220. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1424-8220/24/9/2668>>. Citado na página 17.

APÊNDICE A – FLUXOGRAMA GERAL DA METODOLOGIA

