

Universidade Federal de Goiás
Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação

Felipe Cardoso Tavares Silva

**Avaliação de parâmetros e utilização do tempo de parada na
qualidade construtiva de uma peça de alumínio fabricada por
Manufatura Aditiva por Deposição a Arco**

Goiânia

2023



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): Felipe Cardoso Tavares Silva

Título do trabalho: Avaliação de parâmetros e utilização do tempo de parada na qualidade construtiva de uma peça de alumínio fabricada 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 **Demóstenes Ferreira Filho, Professor do Magistério Superior**, em 16/08/2023, às 17:04, 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 **Felipe Cardoso Tavares Silva, Usuário Externo**, em 17/08/2023, às 11:00, 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 **3969736** e o código CRC **863FFD7D**.

Referência: Processo nº 23070.022449/2023-03

SEI nº 3969736

Felipe Cardoso Tavares Silva

**Avaliação de parâmetros e utilização do tempo de parada na
qualidade construtiva de uma peça de alumínio fabricada por
Manufatura Aditiva por Deposição a Arco**

Projeto Final de Curso apresentado como
requisito para a obtenção de título de Bacharel em
Engenharia Mecânica pelo curso de Engenharia
Mecânica da Universidade Federal de Goiás.

Orientador: Demostenes Ferreira Filho
(EMC/UFG)

Goiânia

2023

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

Silva, Felipe Cardoso Tavares

Avaliação de parâmetros e utilização do tempo de parada na qualidade construtiva de uma peça de alumínio fabricada por Manufatura Aditiva por Deposição a Arco [manuscrito] / Felipe Cardoso Tavares Silva. - 2023.

62 f.

Orientador: Prof. Demostenes Ferreira Filho.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC), Engenharia Mecânica, Goiânia, 2023.

Bibliografia. Anexos. Apêndice.

1. Manufatura Aditiva (MA). 2. Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA). 3. GMAW. 4. Tempo de parada. 5. Alumínio. I. Filho, Demostenes Ferreira , 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

ATA DE AVALIAÇÃO DE PROJETO FINAL

Curso

() Eng Elétrica	(X) Eng Mecânica	() Eng Computação PFC 1 () PFC 2 ()
------------------	--------------------	---

Título do Trabalho

Avaliação de parâmetros e utilização do tempo de parada na qualidade construtiva de uma peça de alumínio fabricada por Manufatura Aditiva por Deposição a Arco

Banca Avaliadora

Membro 1	Demostenes Ferreira Filho
Membro 2	Thales Marcelo Pereira Rodrigues
Membro 3	Eliane Alves Kihara
Membro 4	Daniel Souza

Discente

Matrícula	Nome
201802939	Felipe Cardoso Tavares Silva

NOTAS

Matrícula	Membro 1			Membro 2			Membro 3			Membro 4			Média*
	NPT	NTE	NAA	NPT	NTE	NAA	NPT	NTE	NAA	NPT	NTE	NAA	
201802939	10	8,5	9,0	10	8,5	9,0	10	8,0	9,0	10	8,5	9,0	8,8

NPT – Nota plano de trabalho;

NTE – Nota do trabalho escrito;

NAA – Nota de apresentação e arguição

Para Eng. Elétrica, Mecânica e PFC2 da Eng. Da Computação: $NF = 0,1 \times NPT + 0,45 \times NTE + 0,45 \times NAA$

Para PFC1 da Eng. Da Computação: $NF = 0,3 \times NPT + 0,7 \times NAA$

* A APROVAÇÃO DO(S) ALUNO(S) ESTÁ CONDICIONADA À APRESENTAÇÃO DO TRABALHO FINAL AO ORIENTADOR COM TODAS AS CORREÇÕES SUGERIDAS PELA BANCA.

OBSERVAÇÕES:

Preencher com modificações solicitadas, caso existam. Em caso de reprovação, informar a justificativa.

Arquivos com as sugestões de correções foram enviadas por e-mail pela banca.



Documento assinado eletronicamente por **Demóstenes Ferreira Filho, Professor do Magistério Superior**, em 14/08/2023, às 20:00, 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 **Eliane Alves Kihara, Usuário Externo**, em 14/08/2023, às 20:01, 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 14/08/2023, às 20:02, 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 **Thales Marcelo Pereira Rodrigues, Usuário Externo**, em 14/08/2023, às 20:10, 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 **3955832** e o código CRC **67B30634**.

Agradecimentos

Meus agradecimentos, primeiramente, à Deus, que sempre me deu forças nos momentos mais difíceis, secundamente, à minha família, pela confiança e por sempre me apoiar em todos os meus objetivos e sonhos.

Agradeço também a todos os docentes do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Goiás (UFG) por todos os ensinamentos, os quais colaboraram para o meu desenvolvimento como engenheiro e como pessoa. Em especial, ao meu orientador Demostenes Ferreira Filho e ao coordenador do curso Daniel Fernandes da Cunha.

Agradeço ao Centro Acadêmico de Engenharia Mecânica (CAEM), do qual tive a oportunidade de fazer parte e à Associação Atlética Acadêmica da Engenharia Mecânica (AAAMEC) pelos momentos incríveis que vivenciei como membro, pelas amizades cultivadas e por tornar minha graduação mais leve.

A minha namorada, Gabriela Zoldan Balena, pela força e o carinho de sempre. A todos os meus amigos, meu muito obrigado pelo companheirismo, pela lealdade e pelos momentos ímpares que vivenciamos, vocês tornaram o processo mais divertido. O curso me rendeu amizades verdadeiras e mais que especiais, pretendo tê-las ao meu lado para o resto da vida. Destaco: Alexandre Correa, André Leme, André Linhares, Guilherme Barros, Guilherme Borges, Gustavo Chuc, Júlia de Bessa, Pedro Carneiro, Tulio Dias e Victor Hugo Ferreira.

RESUMO

Uma vertente do processo de fabricação Manufatura Aditiva (MA) que vem sendo difundida nas indústrias Biomédica, Automobilística e Aeroespacial é a Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA). A MADA consiste na fabricação de componentes metálicas a partir da deposição de multicamadas de cordões de solda sobre um substrato, ou seja, a partir de um modelo tridimensional, divide-se o objeto em camadas, definindo a trajetória na qual será feita a adição de metal, realizando-a por meio de um manipulador robótico. A MA apresenta vantagens quando comparado com outros processos de fabricação, como a usinagem convencional, como a alta taxa de deposição, o menor desperdício de material e a possibilidade de fabricação de peças complexas e de grandes proporções. Entretanto vem enfrentando alguns desafios para se tornar suficientemente maduro e ser aplicado em larga escala na indústria, demandando, assim, uma série de estudos e pesquisas para sua consolidação e amadurecimento. O objetivo deste trabalho foi contribuir para esse amadurecimento por meio da avaliação da influência dos parâmetros utilizados na fabricação pelo processo MADA de uma peça de alumínio com perfil relativamente complexo e da avaliação da influência da utilização de parada entre as camadas na fabricação dessa peça. Para isso utilizou-se um sistema de soldagem GMAW (Gas Metal Arc Welding) pulsado acoplado a um manipulador robótico Yaskawa Motoman HP20D-A80, com arames de alumínio ER4043 de 1,2 mm de diâmetro. Após a programação das trajetórias foram realizados testes preliminares no formato de um aerofólio, tendo como parâmetros padronizados a Distância entre o Bico de Contato e a Peça (DBCP) em 18 mm e o GAP de subida em 0,5 mm e como parâmetros variados a velocidade de deposição (cm/min), a corrente de soldagem no modo sinérgico (A) e a vazão do gás argônio puro (L/min). Na sequência fabricou-se dois aerofólios com 100 camadas cada um, o primeiro sem parada e o segundo com parada de 30 segundos entre cada camada, com o intuito de realizar uma análise dimensional e comparar tempo gasto na fabricação, altura, espessura, porosidade e acabamento superficial.

Palavras-chave: Manufatura Aditiva (MA). Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA). GMAW. Tempo de parada. Alumínio.

ABSTRACT

An aspect of the Additive Manufacturing (AM) manufacturing process that has been widespread in the Biomedical, Automobile and Aerospace industries is the Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM). WAAM consists in the manufacture of metallic components from the deposition of multilayers of weld beads on a substrate, that is, from a three-dimensional model, the object is divided into layers, defining the trajectory in which the addition of metal, performing it by means of a robotic manipulator. The AM has advantages when compared to other manufacturing processes, such as conventional machining, such as a high deposition rate, less material waste, and the possibility of manufacturing complex parts of large proportions. However, it has been facing some challenges to become sufficiently mature and to be applied on a large scale in the industry, thus demanding a series of studies and research for its consolidation and maturation. The objective of this work was to contribute to this maturation through the evaluation of the influence of the parameters used in the manufacture by the WAAM process of an aluminum part with a relatively complex profile and the evaluation of the influence of the use of stop between layers in the manufacture of this part. For this, a pulsed GMAW (Gas Metal Arc Welding) welding system was used coupled to a Yaskawa Motoman HP20D-A80 robotic manipulator, with ER4043 aluminum wires of 1.2 mm in diameter. After programming the trajectories, preliminary tests were carried out in the format of an airfoil, having as standardized parameters the Contact Tip to Work Distance (CTWD) in 18 mm and the rise GAP in 0.5 mm and as varied parameters the deposition velocity (cm/min), the welding current in synergic mode (A) and the pure argon gas flow rate (L/min). Next, two airfoils were manufactured with 100 layers each, the first without stopping and the second with a 30-second stop between each layer, to perform a dimensional analysis and compare the time spent in the manufacture, height, thickness, porosity, and surface finish.

Keywords: Additive Manufacturing (AM). Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM). GMAW. Stop time. Aluminum.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Processos de Manufatura Aditiva classificados de acordo com sua fonte de calor e alimentação	14
Figura 2.2 – Fabricação no processo MADA	15
Figura 2.3 – Relação entre velocidade de alimentação e corrente de soldagem de acordo com o diâmetro do arame	19
Figura 2.4 – Relação entre a distância entre o bico de contato e a peça com a corrente de soldagem	19
Figura 2.5 – Porosidade em uma peça de alumínio fabricada pela técnica CMT pulsado em MADA	22
Figura 3.1 – Estação de trabalho no LAMAF	23
Figura 3.2 – Terminologia de um aerofólio	24
Figura 3.3 – Aerofólio NACA4 na Interface do site Airfoil Tools	25
Figura 3.4 – Desenho do aerofólio no Autodesk Inventor CAD 3D	25
Figura 3.5 – Interface do RoboDK após a importação do desenho feito no Inventor ..	26
Figura 3.6 – Estação de trabalho no RoboDK	26
Figura 3.7 - Interface de acesso no RoboDK das funcionalidades “Define Tool Frame” e “Define Reference Frame”	27
Figura 4.1 – Aspecto visual superior do aerofólio do teste 01	32
Figura 4.2 – Aspecto visual superior do aerofólio do teste 02	32
Figura 4.3 – Aspecto visual superior do aerofólio do teste 03	33
Figura 4.4 – Aspecto visual superior do aerofólio do teste 04	33
Figura 4.5 – Aspecto visual superior do aerofólio do teste 05	34

Figura 4.6 – Aspecto visual superior do aerofólio do teste 06	34
Figura 4.7 – Aspecto visual superior do aerofólio do teste 07	35
Figura 4.8 – Aspecto visual superior do aerofólio do teste 08	36
Figura 4.9 – Aspecto visual superior do aerofólio do teste 09	36
Figura 4.10 – Aspecto visual superior do aerofólio do teste 10	36
Figura 4.11 – Aspecto visual superior do aerofólio do teste 11	37
Figura 4.12 – Aspecto visual superior do aerofólio do teste 12	37
Figura 4.13 – Aspecto visual lateral dos testes 13, 14, 15 e 16	38
Figura 4.14 – Aspecto visual superior do bordo de fuga dos testes 13, 14, 15 e 16	38
Figura 4.15 – Aspecto visual superior dos aerofólios dos testes 17 (T1, esquerda) e 18 (T2, direita)	39
Figura 4.16 – Aspecto visual superior dos aerofólios dos testes 19 (T3), 20 (T4), 21 (T5), 22 (T6), 23 (T7), 24 (T8) e 25 (T9)	40
Figura 4.17 – Aspecto visual superior e lateral dos aerofólios dos testes 19 (T3), 20 (T4), 21 (T5), 22 (T6), 23 (T7), 24 (T8) e 25 (T9)	41
Figura 4.18 – Aerofólio com 300 camadas	43
Figura 4.19 – Vista lateral 1 do aerofólio com 100 camadas sem tempo de parada entre cada camada	44
Figura 4.20 – Vista lateral 2 do aerofólio com 100 camadas sem tempo de parada entre cada camada	45
Figura 4.21 – Vista superior do aerofólio com 100 camadas sem tempo de parada entre cada camada	45
Figura 4.22 – Vista lateral 1 do aerofólio com 100 camadas com tempo de parada de 30 segundos entre cada camada	46

Figura 4.23 – Vista lateral 2 do aerofólio com 100 camadas com tempo de parada de 30 segundos entre cada camada	46
Figura 4.24 – Vista superior do aerofólio com 100 camadas com tempo de parada de 30 segundos entre cada camada	46
Figura 4.25 – Distribuição dos pontos no aerofólio com 100 camadas sem tempo de parada entre cada camada	47
Figura 4.26 – Distribuição dos pontos no aerofólio com 100 camadas com tempo de parada de 30 segundos entre cada camada	47
Figura 4.27 – Aparato experimental para medição da retilineidade em cada ponto marcado no aerofólio	47
Figura 4.28 – Localização do corte nos aerofólios	49
Figura 4.29 – Vista interna do corte feito no aerofólio sem tempo de parada entre camadas	50
Figura 4.30 – Vista interna do corte feito no aerofólio com tempo de parada entre camadas	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Parâmetros variados nos sete primeiros testes	31
Tabela 4.2 – Parâmetros variados nos cinco testes seguintes	35
Tabela 4.3 – Velocidade de deposição nos pontos 1 a 110 dos aerofólios dos testes 19 a 25	41
Tabela 4.4 – Velocidade de deposição nos pontos 111 a 189 dos aerofólios dos testes 19 a 25	42
Tabela 4.5 – Velocidade de deposição nos pontos 190 a 215 dos aerofólios dos testes 19 a 25	42
Tabela 4.6 – Resultados obtidos com as medições de altura, largura e retilidade em cada ponto dos dois aerofólios	48
Tabela 4.7 – Variação da largura das paredes na seção transversal do corte	50

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 Objetivos	12
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1 Manufatura aditiva	13
2.2 Manufatura aditiva por deposição a arco	14
2.3 Influência dos parâmetros na soldagem GMAW	17
2.4 Manufatura aditiva por deposição a arco utilizando alumínio	20
3 MATERIAIS E MÉTODOS	23
3.1 Materiais	23
3.2 Métodos	24
3.2.1 Programação das trajetórias	24
3.2.2 Testes preliminares	29
3.2.3 Confecção e análise dimensional dos aerofólios	30
4 RESULTADOS	31
4.1 Testes preliminares	31
4.2 Confecção e análise dimensional dos aerofólios	43
5 CONCLUSÕES	52
6 TRABALHOS FUTUROS	53
REFERÊNCIAS	54
APÊNDICE	58
ANEXO	61

1 INTRODUÇÃO

A palavra manufatura surgiu no idioma Latim, sendo sua etimologia formada pela junção das palavras Manus, que significa "mão", e Factura, uma conjugação do verbo "fazer", remetendo a algo feito manualmente. Com a eclosão das revoluções industriais, o trabalho manual, que costumava ser feito com auxílio de força animal ou de elementos da natureza, passou a ser realizado pelas máquinas à vapor. Posteriormente, os avanços tecnológicos, o surgimento de novas fontes de energia e a criação da eletrônica e da informática, possibilitaram o desenvolvimento da manufatura. Nesse cenário, a manufatura vem amadurecendo ao longo do tempo, principalmente pela influência da automação dos processos, da comunicação entre as máquinas e dos sistemas de produção, proporcionados pelo avanço da robótica, internet das coisas e inteligência artificial, que possibilitaram o surgimento de novos processos de fabricação, cabendo destacar a Manufatura Aditiva (MA).

O processo manufatura aditiva consiste na impressão de camadas sucessivas de materiais que são formadas umas sobre as outras, podendo ser utilizado na confecção de uma ampla variedade de estruturas com geometrias complexas a partir de dados de modelos tridimensionais (3D), sendo, portanto, uma oposição às metodologias de fabricação subtrativas, como a usinagem convencional [1].

Os métodos de realização de MA vêm, nas últimas décadas, atraindo a atenção de várias indústrias, como biomédica, automotiva e aeroespacial [2]. Dentre esses métodos está a Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA) que consiste na combinação de alimentação por arame metálico e soldagem a arco [3]. Esse método é iniciado com a modelagem do componente em CAD 3D, seguido da determinação do caminho a ser percorrido. A fabricação é feita por meio da soldagem de cordões que se sobrepõem. O procedimento de fabricação é executado através de uma máquina como um braço robótico ou arranjos CNC, sendo este componente responsável pela deposição de metal na trajetória preestabelecida [3].

O processo MADA possui alta aplicabilidade, porém enfrenta problemas relacionados às variáveis do processo como tensão e corrente elétrica de soldagem, velocidade de alimentação do arame, vazão do gás de proteção e temperatura entre

camadas. A solução desses problemas vem sendo buscada por meio do desenvolvimento de estudos e trabalhos que abordam as influências dos parâmetros desse processo.

Diante disso, este trabalho tem como motivação o desenvolvimento do processo manufatura aditiva por deposição a arco utilizando-se a soldagem GMAW pulsado, verificando a influência da variação de seus parâmetros e a utilização de parada entre camadas na fabricação de uma peça de alumínio com perfil relativamente complexo. A escassez de trabalhos na literatura sobre essa temática também serviu de motivação para a pesquisa.

1.1 Objetivos

Este trabalho possui o intuito de contribuir com os avanços tecnológicos na área de manufatura aditiva por deposição a arco (MADA), tendo como objetivo geral avaliar a influência dos parâmetros utilizados na fabricação pelo processo MADA de uma peça de alumínio com perfil relativamente complexo e avaliar a influência da utilização de parada entre as camadas na fabricação dessa peça.

Para isso, têm-se como objetivos específicos:

- Programar trajetórias por meio dos softwares RoboDK e Autodesk Inventor CAD 3D e do controlador DX100 do robô Yaskawa Motoman HP20D-A80.
- Parametrizar a confecção de paredes uniformes com bom acabamento e baixa porosidade pelo processo MADA.
- Comparar aerofólios fabricados com 100 camadas sem parada e com parada de 30 segundos entre cada camada.
- Realizar análise dimensional dos resultados obtidos na fabricação dos aerofólios de 100 camadas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Manufatura aditiva

A manufatura aditiva (MA), também conhecida como impressão 3D ou prototipagem rápida, é um processo de fabricação utilizado na confecção de uma ampla variedade de estruturas a partir de dados de modelos tridimensionais (3D), sendo, portanto, uma oposição às metodologias de fabricação subtrativas, como a usinagem convencional [1]. O processo consiste na impressão de camadas sucessivas de materiais que são formadas umas sobre as outras. Essa tecnologia foi desenvolvida por Charles Hull em 1986 em um processo conhecido como estereolitografia [1].

As técnicas de manufatura aditiva (MA) vêm, nas últimas décadas, atraindo a atenção de várias indústrias, como biomédica, automobilística e aeroespacial [2]. As principais vantagens da MA em comparação com os processos de fabricação convencionais (PFC) são: tornar possível a construção de estruturas complexas que são difíceis de fabricar pelos PFC [4]; reduzir a quantidade de resíduos material, o que impacta positivamente no preço final das peças; reduzir o consumo de energia e ajudar na proteção do meio ambiente, uma vez que o tempo de produção e o peso das peças diminuem devido a designs modernos e materiais especiais [5].

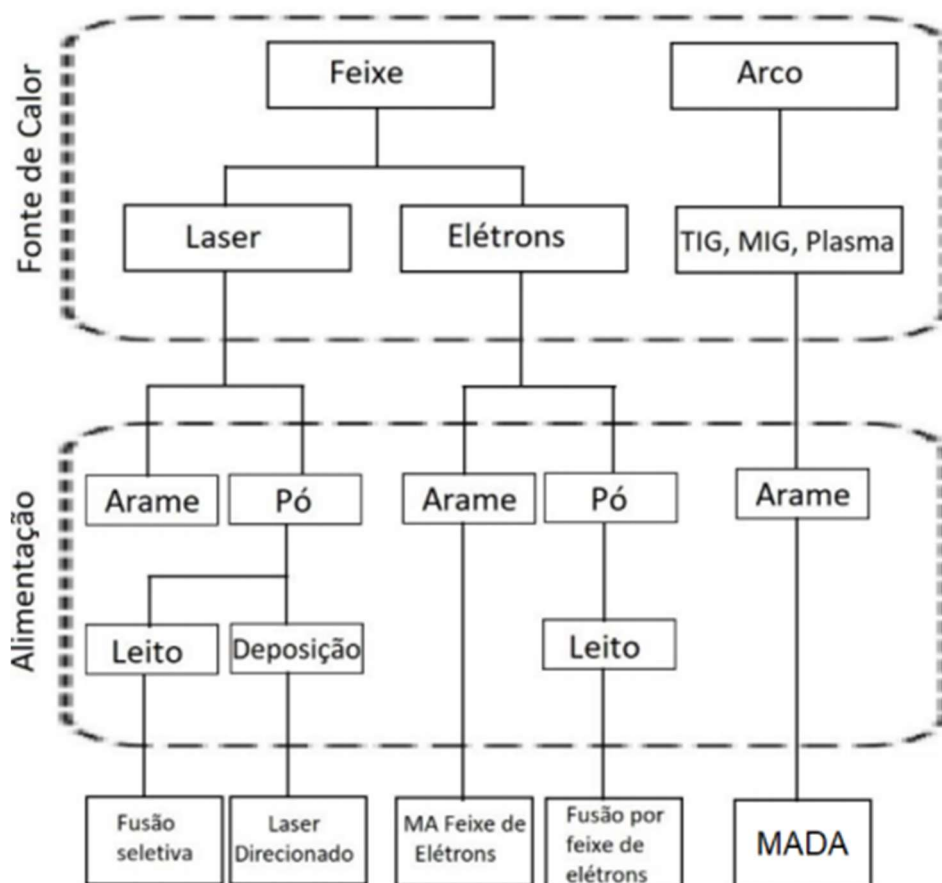
Apesar dos benefícios e facilidades da manufatura aditiva este método de fabricação traz consigo alguns problemas que, para serem solucionados, seriam necessários mais pesquisas e desenvolvimento [1]. Esses problemas incluem altos custos, aplicações limitadas em grandes estruturas e produção em massa, propriedades mecânicas inferiores e anisotrópicas, limitação de materiais e defeitos [1].

Neste processo de fabricação pode-se utilizar diversos materiais, dos quais, cabe citar, metais, polímeros, cerâmicas e concreto. O ácido poli láctico (PLA) e a acrilonitrila butadieno estireno (ABS) são os principais polímeros usados na tecnologia 3D de impressão de compósitos [1]. Já os metais e ligas avançadas são normalmente utilizadas no setor aeroespacial porque os processos tradicionais são mais

demorados, difíceis e caros. A cerâmica é bastante utilizada, por exemplo, em andaimes e o concreto é empregado na manufatura aditiva de edifícios [1].

Os processos de manufatura aditiva podem ser classificados de acordo com sua fonte de calor e alimentação, conforme mostra a Figura 2.1. Cabe destacar a Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA), sendo que esta vem ganhando cada vez mais espaço no cenário técnico-científico e industrial.

Figura 2.1 – Processos de Manufatura Aditiva classificados de acordo com sua fonte de calor e alimentação



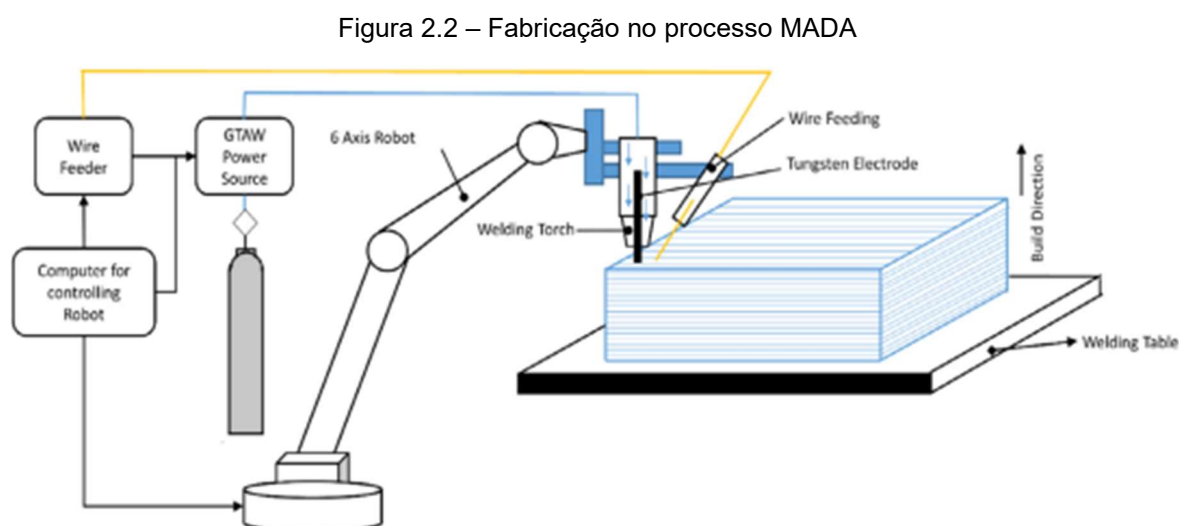
Fonte: [6]

2.2 Manufatura aditiva por deposição a arco

Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA) é uma abordagem do processo de Manufatura Aditiva (MA) que consiste na combinação de alimentação por arame metálico e soldagem a arco [3]. Outra definição desse processo é a de que a

manufatura aditiva por deposição a arco refere-se a um grupo específico de técnicas de manufatura aditiva que usam um arco elétrico como fonte de calor e um fio de metal como matéria prima [5]. O tipo de soldagem a arco depende das necessidades e objetivos do projeto, os principais tipos são: Gas Tungsten Arc Welding (GTAW), Plasma Arc Welding (PAW) e Gas Metal Arc Welding (GMAW) [7].

O processo MADA é iniciado pela modelagem em CAD 3D, seguido da determinação do caminho a ser percorrido. A fabricação é feita por meio da soldagem de cordões que se sobrepõem. O procedimento de fabricação é executado através de uma máquina como um braço robótico ou arranjos CNC, sendo este componente responsável pela deposição de metal na trajetória preestabelecida [3]. O processo está exemplificado na Figura 2.2.



Fonte: [8]

A respeito da taxa de depósito em MADA, sabe-se que ela é maior do que nos outros métodos de MA. Por exemplo, no método Selective Laser Melting (SLM) as taxas de deposição de aço em fusão atingem 0,1 (kg/h) e no Laser Metal Deposition (LMD) pode atingir até 1 (kg/h) de depósito de aço, já a taxa de deposição de aço na tecnologia MADA pode variar de 5 a 6 (kg/h). Essa vantagem faz com que o MADA seja usado na produção de peças grandes [9]. Já a respeito da rugosidade da superfície de peças produzidas em MADA sabe-se que esta é alta e que geralmente há a necessidade de uma etapa de usinagem após sua fabricação [10].

Uma das três principais formas de soldagem a arco utilizadas no processo MADA é a Gas Tungsten Arc Welding (GTAW) ou soldagem a arco de gás inerte de tungstênio, tratando-se de uma técnica de soldagem onde um arco elétrico é formado dentro de uma atmosfera de gás inerte entre um eletrodo de tungstênio não consumível e a peça de trabalho [11]. Outra forma é a Plasma Arc Welding (PAW) ou soldagem a arco de plasma, que se assemelha à soldagem a arco de gás inerte de tungstênio, com a diferença de que a PAW traz uma densidade energética muito maior no arco e produz velocidade e momento de gás muito maiores, restringindo o arco a fluir através de um bocal [12]. A última forma é a Gas Metal Arc Welding (GMAW) ou soldagem a arco de metal a gás, trata-se de um processo no qual o arco elétrico é a fonte de calor e é formado entre um eletrodo consumível e a peça de trabalho. Um fluxo de gás inerte ou ativo protege o arco e a poça de fusão durante a soldagem [13]. MADA baseado em GMAW é muito adequado para a produção de grandes peças em um curto espaço de tempo devido a maiores taxas de deposição.

Em contraposição às vantagens do processo MADA têm-se os defeitos desse processo, os quais podem ocorrer por vários motivos, como estratégia de programação ruim, dinâmica instável da poça de fusão devido a configuração de parâmetros deficiente, deformação térmica relacionada ao acúmulo de calor, impacto ambiental (como contaminação por gás) e outros defeitos da máquina [14].

Os maiores desafios do processo MADA são: rugosidade superficial, microestrutura, porosidade e tensão residual. A alta rugosidade superficial das peças produzidas por MADA é um problema que causa restrição na utilização desses componentes, portanto, após o processo MADA, a usinagem da superfície é frequentemente necessária. Os parâmetros do processo MADA, como entrada de calor, velocidade de deposição e altura da camada afetam a rugosidade da superfície [10]. A rugosidade superficial das paredes de liga Al-Mg feitas por MADA baseado em GMAW depende de uma faixa específica de velocidade de soldagem. Se a velocidade de deposição for baixa, a rugosidade superficial e o custo de produção aumentarão. Por outro lado, se a velocidade de deposição for muito alta, as lombadas, e vales se formam sobre as camadas, uma vez que o arco fica instável [15].

Em relação a microestrutura tem-se que o aquecimento rápido e, posteriormente, o resfriamento rápido é a principal causa da heterogeneidade na

microestrutura dos componentes fabricados pelo processo MADA. Os grãos dendríticos colunares são o principal fator das características heterogêneas, pois as propriedades mecânicas das peças feitas por MADA variam nas direções vertical e horizontal. Mudar a estrutura do grão de colunar para grãos dendríticos equiaxiais se mostra muito adequado para alcançar propriedades mecânicas homogêneas [5].

Em relação às tensões residuais é importante discorrer a respeito do ciclo térmico do processo MADA, que consiste em três etapas. A primeira é o rápido aquecimento e fusão da matéria-prima, a segunda é a solidificação da deposição de metal por uma alta taxa de resfriamento e a terceira é a fusão das camadas subjacentes anteriormente solidificadas pela deposição de novas camadas [16]. A deformação na camada depositada é devido a expansão e contração térmica do material. Sempre haverá uma deformação devido a contração na camada depositada após a etapa dois, e é assim que a tensão residual é gerada na camada depositada. A camada é anexada ao substrato ou camada anterior, e a deformação plástica compressiva não é possível. Portanto, tensão residual de tração será criada na camada depositada. Este problema será mais complexo considerando as fases de transformação de deformação após a etapa três [10].

Cabe destacar que apesar do processo MADA ter se originado da soldagem, a dissipação de calor apresenta certas diferenças. Na soldagem, o calor é conduzido da poça de fusão diretamente para o substrato. Já no MADA, o calor é transferido parcialmente para o substrato através das camadas previamente depositadas e parcialmente para o ambiente por convecção e radiação. A resistência térmica condutiva ao substrato aumenta à medida em que a altura da parede depositada aumenta, dissipando maior quantidade de calor para o ambiente. Entretanto, a condução de calor direta para o substrato é mais eficaz do que essa dissipação, pois esta atrasa o processo de solidificação da poça fundida, gerando um cordão de solda mais espesso e com altura menor do que o esperado [17].

2.3 Influência dos parâmetros na soldagem GMAW

Dentre as formas de realizar o processo de Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA) está a Gas Metal Arc Welding (GMAW) ou soldagem a arco de metal

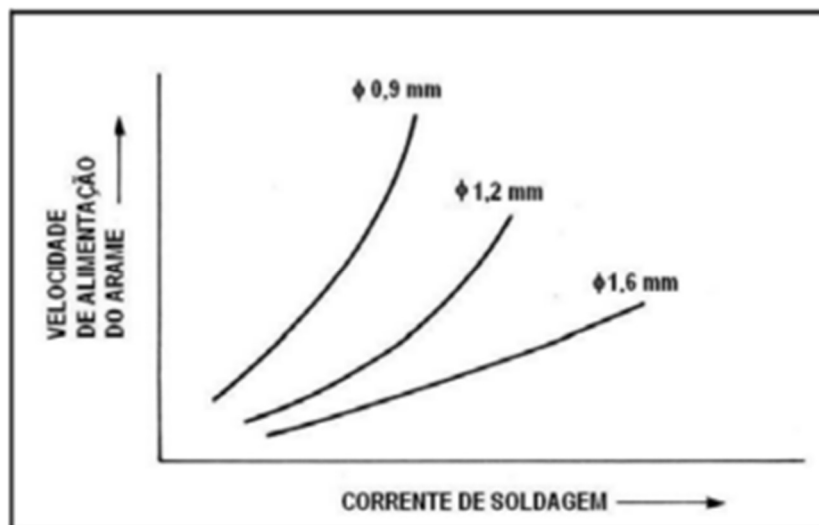
a gás, tratando-se de um processo no qual o arco elétrico é a fonte de calor e é formado entre um eletrodo consumível e a peça de trabalho. Um fluxo de gás inerte ou ativo protege o arco e a poça de fusão durante a soldagem [13]. MADA baseado em GMAW é muito adequado para a produção de grandes peças em um curto espaço de tempo devido a maiores taxas de deposição.

A técnica GMAW possibilita a utilização de ligas de alumínio, cobre, aço, latão, titânio e níquel. O diâmetro do arame, utilizado como material de alimentação, está na faixa de 0,6 mm a 1,6 mm e a taxa de deposição varia de 3 a 4 kg/h. A seleção do gás de proteção depende do material do arame. Para metais não ferrosos, gases inertes podem ser usados para proteção, por exemplo, argônio e hélio puros e a mistura desses gases é usada para ligas de alumínio, cobre e níquel. A fim de obter melhores taxas de deposição, o ângulo formado pelo eletrodo com a perpendicular deve ser menor que 15° , ângulos maiores que 20° resultam em respingos, menor penetração e menor intensidade do arco [8].

Essa técnica possui como principais parâmetros a tensão (que tem como característica uma curva constante) e corrente de soldagem, a Distância entre o Bico de Contato e a Peça (DBCP), a velocidade de deposição do arame e a temperatura entre as camadas [18].

Ao considerar o parâmetro DBCP constante, pode-se observar conforme a Figura 2.3 que a corrente e a velocidade de alimentação se relacionam de forma direta, ou seja, ao elevar a velocidade de alimentação do arame a corrente de soldagem também aumentará [19].

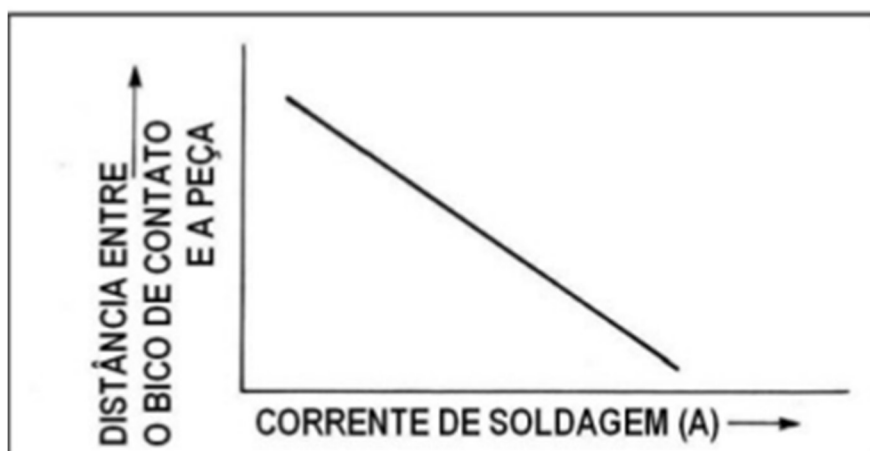
Figura 2.3 – Relação entre velocidade de alimentação e corrente de soldagem de acordo com o diâmetro do arame



Fonte: [19]

Pode-se definir velocidade de alimentação (soldagem) como uma razão entre a trajetória feita pelo arco na soldagem da peça por um determinado tempo decorrido para efetuar essa trajetória. Nos processos que envolvem peças de espessura mais elevada, a velocidade tende a diminuir. Caso a velocidade de alimentação do arame se mantenha constante, e a variação ocorra aumentando a DBCP, a corrente de soldagem diminuirá, conforme se observa na Figura 2.4 [19].

Figura 2.4 – Relação entre a distância entre o bico de contato e a peça com a corrente de soldagem



Fonte: [19]

Existem quatro modos principais de transferência de metal para GMAW: globular, curto-circuito, spray e spray pulsado. Para a redução da quantidade de entrada de calor, modos de transferência mais avançados como Cold Metal Transfer (CMT) e Surface Tension Transfer (STT) foram desenvolvidos. A base desses modos pode ser considerada um tipo otimizado de curto-circuito e spray pulsado [20].

O ajuste dos parâmetros no modo transferência de metal por spray pulsado (GMAW-P) é realizado por tentativa e erro, o que demanda muito tempo. Para alcançar transferência controlada durante a soldagem por pulso, é essencial que a taxa de alimentação do arame seja balanceada por taxa de fusão. Isso significa atingir uma gota por pulso o tempo todo, fazendo-se necessário o controle constante de todos os parâmetros do pulso [21]. Existe uma classe de suprimentos GMAW-P, chamadas fontes de alimentação sinérgicas. Nesta classe, a fonte de alimentação e o alimentador de arame são diretamente ligados de tal forma que, de acordo com as configurações de velocidade de alimentação do arame, o valor da corrente média é inalterado durante o processo de soldagem, gerando um arco estável [22]. Esta classe vem sendo amplamente utilizada, uma vez que facilita o trabalho dos operadores na definição e obtenção de bons parâmetros de soldagem.

2.4 Manufatura aditiva por deposição a arco utilizando alumínio

A maioria dos pesquisadores e indústrias, como a aeroespacial e automobilística têm se concentrado no estudo do processo de Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA) utilizando ligas de alumínio, titânio e aço [8]. As ligas de alumínio vêm se destacando por possuir a menor razão peso/força entre os materiais citados e por sua baixa densidade específica, boa resistência à corrosão, boa ductilidade e boa conformabilidade [23].

No processo MADA utilizando alumínio, a transferência de gotas de metal e o arco elétrico são os principais fatores que influenciam a qualidade do componente fabricado [24]. A realização de experimentos em MADA utilizando alumínio ER4043 evidenciou que a eficiência de fabricação é maior para arco pulsado em comparação com o arco não pulsado e concluiu que, para o alumínio e suas ligas, o processo

MADA se torna mais adequado quando baseado em GMAW com arco pulsado [24]. A realização de experimentos com diferentes ligas de alumínio como material de deposição em MADA, como ER1100, ER4043, ER4943, ER4047 e ER5356 concluíram que, ao considerar resistência e porosidade, a série 4000 exibiu melhor desempenho do que as outras séries [25].

Além disso, nos processos de manufatura aditiva mantendo-se os outros parâmetros constantes, ao diminuir a temperatura de intercamada, isto é a temperatura final da camada que foi depositada quando se iniciar a próxima deposição, a superfície da peça fabricada será de boa qualidade superficial com rugosidade menor. A diminuição dessa temperatura está relacionada a um tempo de espera maior entre as deposições, prejudicando a produtividade. Desta forma, uma maneira de diminuir esse tempo de espera é trabalhar com sistemas de resfriamento ativo, como por exemplo jato a ar, água, arame frio, entre outros [26].

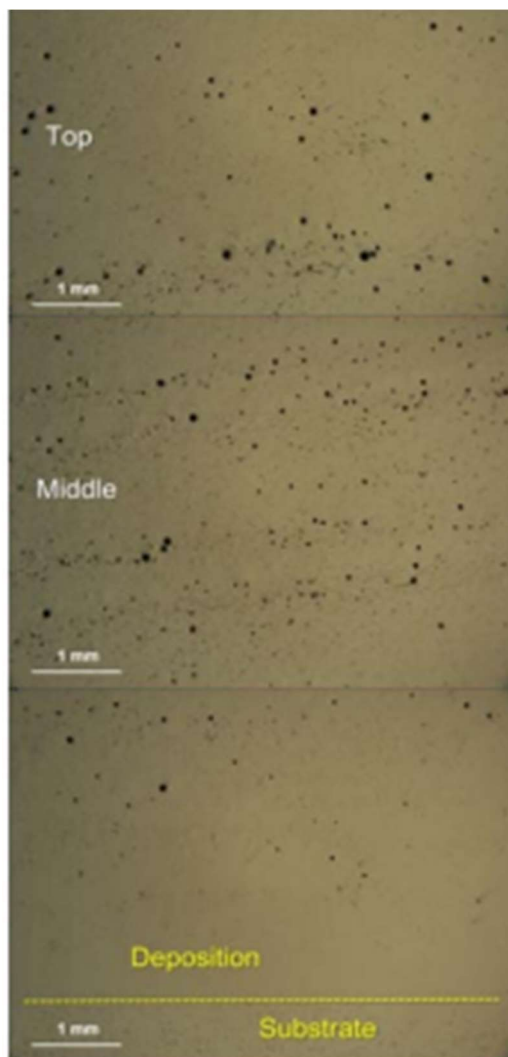
Os problemas encontrados na execução do processo MADA utilizando ligas de alumínio são a alta refletividade, alta condutividade térmica que leva à rápida dissipação de calor, alta solubilidade do hidrogênio no alumínio líquido levando a formação de poros e a oxidação da superfície do material devido à formação de Al_2O_3 , uma vez que a contração de solidificação é maior, em comparação com materiais metálicos ferrosos, devido à ampla faixa de temperatura de solidificação e ao alto coeficiente de expansão térmica (CTE) ocasionando fenômenos de rachaduras devido a tensões de solidificação e encolhimento elevadas [27].

Os principais desafios enfrentados na realização do processo de manufatura aditiva por deposição a arco utilizando alumínio e suas ligas são: 1) Porosidade, uma vez que certa quantidade de hidrogênio é necessária para nuclear as bolhas geradas na poça de fusão e quando o teor de hidrogênio excede o nível exigido causa porosidade, levando à baixa resistência mecânica do componente fabricado [28]; 2) Rachaduras e deformação, sendo que rachaduras se desenvolverão quando o valor da tensão residual exceder a resistência à tração final do material, já a deformação irá se desenvolver quando a tensão residual está entre o limite de resistência e limite de escoamento [29]; 3) Tensão residual de tração, tratando-se da tensão desenvolvida quando não há força externa atuando sobre o material depositado, influenciando na resistência à fadiga e nas propriedades mecânicas [30]; 4) Delaminação, sendo esta,

a separação de camadas adjacentes uma das outras do material depositado, ocorrendo pela refundição imprópria da camada subjacente ao depositar novas camadas de metal [31].

A Figura 2.5 evidencia o problema da porosidade.

Figura 2.5 – Porosidade em uma peça de alumínio fabricada pela técnica CMT pulsado em MADA



Fonte: [28]

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

Os materiais utilizados no processo de manufatura aditiva por deposição a arco em alumínio realizado no Laboratório de Materiais e Processos de Fabricação (LAMAF) da Universidade Federal de Goiás (UFG) foram:

- Robô Yaskawa Motoman HP20D-A80;
- Controlador DX100;
- Fonte Digiplus A7 da IMC Soldagem;
- Exaustor Nederman FILTERCART 3M;
- Um computador;
- Os softwares RoboDK e Autodesk Inventor CAD 3D;
- Cilindros de gás Argônio puro (99,99%);
- Uma mesa com gabarito de fixação;
- Rolos de arame de alumínio ER4043 com 1,2 mm de diâmetro;
- Chapas fundidas de alumínio com espessura de 10 mm.

Alumínio ER 4043 foi utilizado como material de adição, Argônio puro como gás de proteção e chapas fundidas de alumínio como substrato. A estação de trabalho utilizada está representada na Figura 3.1.

Figura 3.1 – Estação de trabalho no LAMAF

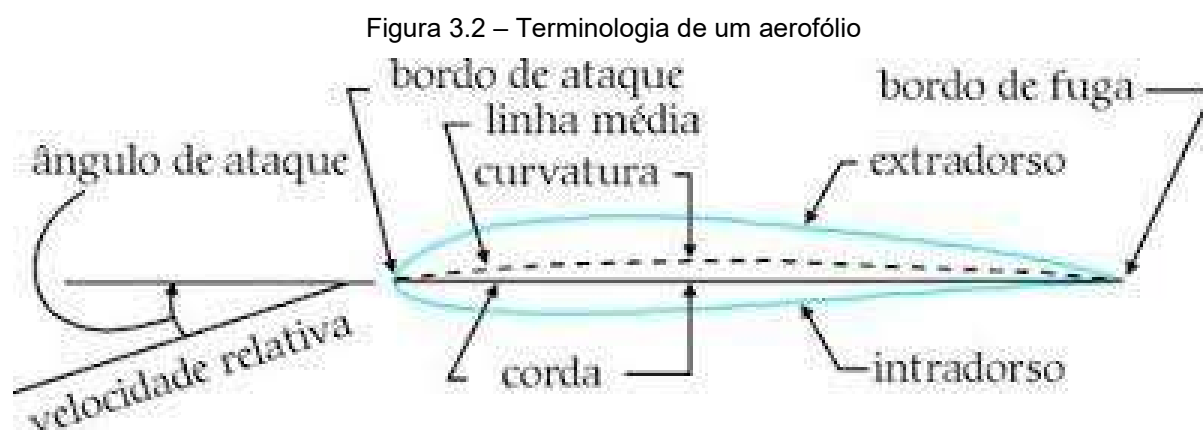


Fonte: próprio autor

3.2 Métodos

3.2.1 Programação das trajetórias

A estrutura escolhida para ser fabricada pelo processo de manufatura aditiva por deposição a arco (MADA) utilizando alumínio foi um aerofólio. Esse componente mecânico pode ser definido como sendo um corpo de formato aerodinâmico capaz de gerar sustentação e não criar arrasto excessivo, bem como sendo um corpo ou uma estrutura cuja forma permite obter uma reação aerodinâmica quando atravessa o ar [32]. A Figura 3.2 foi inserida com o intuito de exemplificar as partes de um aerofólio e suas nomenclaturas.



Fonte: [33]

A programação das trajetórias que seriam realizadas pelo robô HP20D-A80 foi feita por meio do site Airfoiltools.com [34] onde seria selecionado o tipo de aerofólio desejado, neste caso foi o NACA4. Inseriu-se os dados de entrada e com isso o site gerou uma sequência de pontos com suas respectivas coordenadas cartesianas. Esses pontos foram tratados e adicionados a uma planilha no programa Excel para que pudessem ser utilizados a posteriori. Adequou-se as proporções do Aerofólio utilizando equações matemáticas para que ele ficasse com as dimensões desejadas, no caso todas as dimensões foram aumentadas em 200 vezes. Em seguida, foi gerado, no software Inventor, o desenho do aerofólio por meio do arquivo dos pontos em xlsx. A partir daí em uma sequência simples de passos o desenho é automaticamente gerado no software RoboDk, que já deve estar previamente aberto

e com a estação de trabalho preparada. No software RoboDK é possível a edição de parâmetros e comandos, além da possibilidade de simular a trajetória para verificar a existência de erros por meio da estação de trabalho virtual.

Figura 3.3 – Aerofólio NACA4 na Interface do site Airfoil Tools

The screenshot displays the 'Airfoil Tools' website interface. At the top, there is a search bar with 1638 airfoils and a Google search engine. The main heading is 'NACA 4 digit airfoil generator (NACA 0012 AIRFOIL)'. A central plot shows the airfoil shape on a grid. Below the plot is a control panel with the following fields and options:

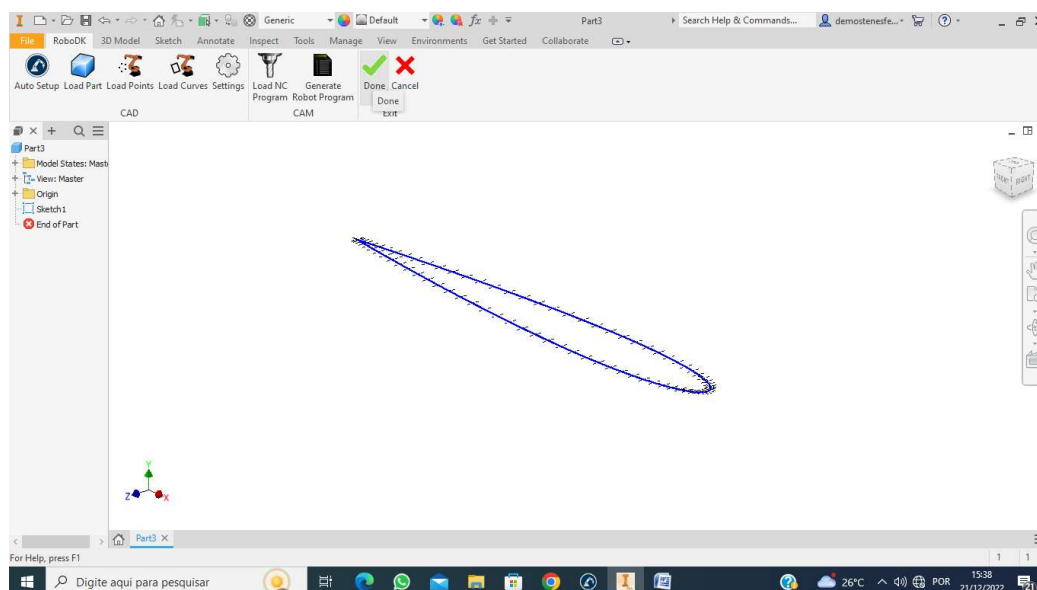
- Max Camber (%): 0 (First digit: 0 to 9.5%)
- Max camber position (%): 0 (Second digit: 0 to 90%)
- Thickness (%): 12 (Third & fourth digit: 1 to 40%)
- Number of points: 80 (20 to 200)
- Cosine spacing: (Cosine or linear spacing)
- Close Trailing edge: (Open or closed TE)

A 'Dat file' section shows the generated data for NACA 0012:

```
NACA_0012_A1Pfo11_M=0.0K_P=0.0K_T=12
1, 0.00000, -0.00000
0, -0.998459, 0.000224
0, -0.993844, 0.000891
0, -0.986185, 0.001990
0, -0.975528, 0.003501
0, -0.961940, 0.005399
0, -0.945503, 0.007651
0, -0.926320, 0.010221
```

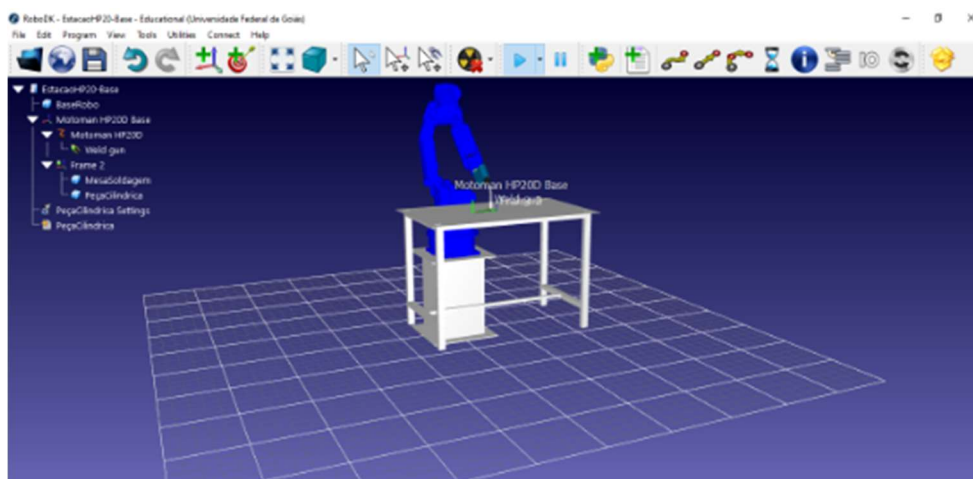
Fonte: próprio autor.

Figura 3.4 – Desenho do aerofólio no Autodesk Inventor 3D CAD



Fonte: próprio autor.

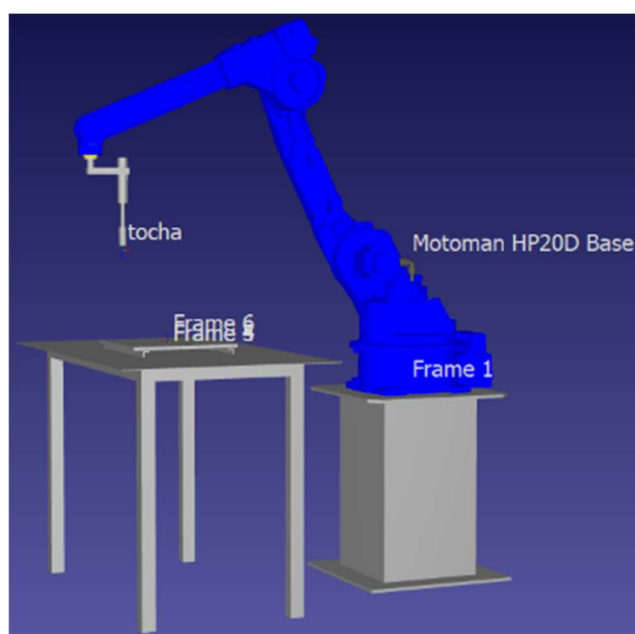
Figura 3.5 – Interface do RoboDK após a importação do desenho feito no Inventor



Fonte: próprio autor.

A estação de trabalho virtual é composta pelo robô e sua base, tocha e seu suporte, mesa e gabarito de fixação. Na biblioteca do software RoboDK já constava o robô Yaskawa Motoman HP20D-A80 e após medições realizadas na estação de trabalho real os demais componentes foram modelados utilizando o Autodesk Inventor CAD 3D e importados para o RoboDK. Esses modelos estão disponíveis no Apêndice.

Figura 3.6 – Estação de trabalho no RoboDK

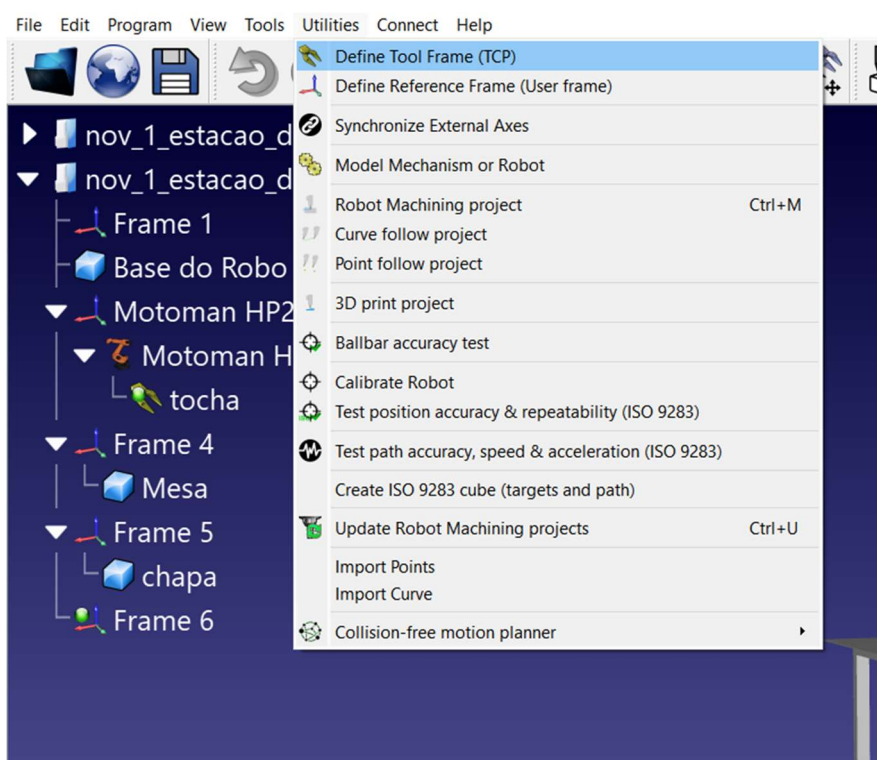


Fonte: próprio autor.

Após a elaboração da estação de trabalho no RoboDK o próximo passo foi conectá-la ao robô Yaskawa Motoman HP20D-A80. Isso se torna possível por meio da conexão de um cabo de ethernet entre a saída do computador e a entrada na fonte e da combinação do endereço de IP do robô com o endereço de IP da conexão de internet do computador com o software instalado. A conexão correta garantirá que a comunicação seja efetiva e que a posição do robô virtual no Software corresponda a posição real do robô.

A correta conexão do robô não garante que o RoboDK saiba onde está a ponta da ferramenta e onde está a mesa, é necessário informar onde está o Tool Center Point ou Tool Frame (TCP) da ferramenta e o Reference Frame onde será realizado o processo. No software acessando a opção “Utilities” é possível selecionar “Define Tool Frame (TCP)” onde será requisitado quatro pontos de referência. Também na opção “Utilities” logo abaixo é possível selecionar “Define Reference Frame (User Frame)” onde será requisitado mais três pontos de referência. O plano de referência utilizado foi o gabarito de fixação presente na mesa.

Figura 3.7 – Interface de acesso no RoboDK das funcionalidades “Define Tool Frame” e “Define Reference Frame”



Fonte: próprio autor.

Após realizar todos esses procedimentos desenvolveu-se uma programação para realizar o incremento em altura. Com o intuito de gerar o loop dessa programação, o primeiro passo foi fazer com que o controle manual a reconhecesse. Para isso, a trajetória gerada é importada para um Pen Drive que é conectado ao controle manual. Utilizando o modo “Gestão”, é possível acessar a função “Memória Externa” e “Carregar” para carregar o conteúdo do Pen Drive. Após carregado, torna-se possível acessá-la no controle DX-100. Nessas etapas utilizou-se o modo “Teach” do controle.

O código desenvolvido e utilizado foi o seguinte:

```
0000 NOP
0001 0001 00   MOVJ VJ=10.00   PL=0
0002 0002 00   MOVJ VJ=0.78    PL=0
0003           CALL JOB:SOLDA-ON
0004           TIMER T=1.00
0005           CALL JOB:Aer30
0006           CLEAR I003 1
0007           SET P000 P002
0008           *INICIO
0009 0003 00   MOVJ VJ=90.00   PL=4
0010           CALL JOB:Aer120
0011           INC I003
0012           ADD P000  P091
0013           SFTON    P000
0014           JUMP *INICIO IF I003<=100
0015           CALL JOB:SOLDA-OFF
0016           END
```

O código acima funciona da seguinte forma: a linha 0001 chama a opção MOVJ (movimentação livre nas juntas) que faz o robô se movimentar em alta velocidade até um ponto próximo do gabarito de fixação; em 0002 finaliza-se a movimentação de aproximação do robô até o gabarito de fixação, ainda em movimento livre (MOVJ)

porém desacelerado. Como existe o risco de choque contra a mesa e/ou gabarito de fixação, é coerente reduzir a velocidade do robô ao final da movimentação de aproximação. A linha 0003 é responsável pelo início do processo de soldagem, já a 0004 determina o tempo de pré gás.

Foram elaboradas duas programações, Aer30 e Aer120, a diferença entre elas é exclusivamente a velocidade de deposição, de 30 cm/min na Aer30 e 120 cm/min na Aer120. O objetivo foi utilizar a programação com menor velocidade para pré-aquecer o substrato e o gabarito de fixação a fim de diminuir os defeitos de soldagem do alumínio e aumentar a adesão.

Tendo em vista a diferenciação entre Aer30 e Aer120, na linha 0005 é realizada uma sequência completa em Aer30, proporcionando o pré-aquecimento do conjunto substrato e gabarito de fixação. Em 0006 é feita a limpeza de quaisquer dados que estivessem vinculados à variável I0003 e substitui-se pelo valor de 01 (um). Em 0007 são definidos os parâmetros de altura e em 0008 o loop é iniciado. Em 0009 têm-se o movimento em MOVJ para o início da soldagem e em 0010 o programa Aer120 é chamado. Na linha 0011 é feito o incremento da variável I003 que contabiliza a quantidade de vezes que o loop se repetiu, contabilizando consequentemente a quantidade de cordões de solda fabricados. Em 0012 é feito o incremento em altura, no caso de P091 é feito o incremento de aproximadamente 0,5 [mm] em altura. A linha 0014 retorna ao início até que se atinja o número de 100 repetições, logo, 100 cordões de solda. Quando esse valor é atingido, 0015 é responsável por finalizar o processo de soldagem. Em 0016 a rotina se encerra.

3.2.2 Testes preliminares

Inicialmente foram realizados testes com poucas camadas que objetivavam encontrar o conjunto de parâmetros que garantisse bom acabamento superficial, paredes uniformes e baixa porosidade ao componente fabricado pelo processo de manufatura aditiva por deposição a arco em alumínio. Os testes foram realizados pelo robô Yaskawa Motoman HP20D-A80 utilizando o modo de soldagem GMAW pulsado sinérgico e tendo como parâmetros padronizados em pré-testes a Distância entre o Bico de Contato e a Peça (DBCP) em 18 mm e o GAP de subida em 0,5 mm. Já os

parâmetros variados foram: velocidade de deposição (cm/min), corrente de soldagem no modo sinérgico (A) e vazão do gás de proteção (L/min).

3.2.3 Confeção e análise dimensional dos aerofólios

Uma vez que a seleção do conjunto de parâmetros eficientes já havia sido feita por meios dos testes preliminares, deu-se início a etapa de confecção do aerofólio. Foram realizados dois testes com 100 camadas cada um, o primeiro sem tempo de parada entre cada camada e o segundo com tempo de parada de 30 segundos entre cada camada.

Foram marcados 10 pontos nos dois aerofólios fabricados com o arame novo para medir a largura do cordão nesses pontos, a altura atingida em cada um desses pontos e a retilidade na linha de cada ponto. A largura e altura foram medidas utilizando um paquímetro da marca COSA com resolução de 0,02 mm. Para a medição da retilidade foram utilizados uma mesa de desempenho, suportes magnéticos e um relógio comparador MITUTOYO 2046A com resolução de 0,01 mm a 10 mm uma vez que o rugosímetro disponível no Laboratório de Metrologia do prédio de engenharia mecânica da Universidade Federal de Goiás (UFG) não possuía resolução suficiente para medir a rugosidade das peças. Realizou-se também um corte transversal em cada aerofólio visando avaliar a porosidade e a largura das paredes em pontos diferentes. O corte foi feito com o auxílio de uma máquina de corte presente no Laboratório de Materiais e Processos de Fabricação (LAMAF) da UFG e a medição da largura das paredes foram realizadas com o auxílio do Software IMAGEJ.

Esses procedimentos foram realizados para possibilitar uma análise dimensional dos aerofólios com 100 camadas, a fim de comparar a discrepância entre o tempo gasto na fabricação, a altura, a espessura, a porosidade e o acabamento superficial.

4 RESULTADOS

4.1 Testes preliminares

A priori foram realizados sete testes com o intuito de determinar parâmetros ideais para a fabricação do aerofólio por meio do processo de manufatura aditiva por deposição a arco utilizando como material de adição alumínio ER4043. A Tabela 4.1 evidencia os parâmetros variados nesses testes.

Tabela 4.1 – Parâmetros variados nos sete primeiros testes

Teste	Corrente no modo sinérgico [A]	Velocidade de Deposição [cm/min]	Vazão de Gás [L/min]	Tempo de parada [s]
1	60	30	15	Sem
2	60	100	15	Sem
3	100	100	15	Sem
4	100	110	15	Sem
5	80	115	15	Sem
6	75	130	30	Sem
7	70	125	30	Sem

Fonte: próprio autor.

No teste representado pela Figura 4.1 foi utilizada velocidade de deposição de 30 cm/min e corrente de soldagem no modo sinérgico de 60 A. Não houve tempo de parada entre as camadas de solda e a vazão de gás, argônio puro 99,99%, estava em 15 L/min. O aerofólio apresentou deposição excessiva de material, cordão de solda

muito largo, acabamento superficial ruim e pontos em que o arco se apagou, dando indícios de que seria necessário alterar todos os parâmetros.

Figura 4.1 – Aspecto visual superior do aerofólio do teste 01



Fonte: próprio autor.

No teste representado pela Figura 4.2 manteve-se a corrente de soldagem no modo sinérgico em 60 A, sem tempo de parada e a mesma vazão de gás, porém a velocidade de deposição foi aumentada para 100 cm/min. Nesse aerofólio observou-se uma redução na deposição de material, cordão de solda mais fino, porém um acabamento superficial ainda ruim e pontos de apagamento do arco, mostrando que o aumento da velocidade de deposição afinava o cordão.

Figura 4.2 – Aspecto visual superior do aerofólio do teste 02



Fonte: próprio autor.

No teste representado pela Figura 4.3 foi mantida a velocidade de deposição em 100 cm/min, continuou sem pausa entre cada camada e com a mesma vazão de gás, porém aumentou-se a corrente de soldagem no modo sinérgico para 100 A. Nesse aerofólio foi observado a diminuição do aspecto de queimado, porém um acabamento superficial ruim e ainda mais pontos nos quais o arco se apagou,

mostrando que a corrente de soldagem no modo sinérgico era um parâmetro sensível que merecia atenção.

Figura 4.3 – Aspecto visual superior do aerofólio do teste 03



Fonte: próprio autor.

No teste representado pela Figura 4.4 manteve-se a corrente de soldagem no modo sinérgico em 100 A, sem tempo de parada e a mesma vazão de gás, porém aumentou-se a velocidade de deposição para 110 cm/min. Nesse aerofólio foi possível observar pontos com deposição excessiva de material e pontos em que o arco se apagou, paredes ainda mais finas, e acabamento superficial permanecendo ruim, evidenciando que apenas a alteração da velocidade não trouxe melhoras significativas dessa vez.

Figura 4.4 – Aspecto visual superior do aerofólio do teste 04



Fonte: próprio autor.

No teste representado pela Figura 4.5 foi utilizada corrente de soldagem no modo sinérgico de 80 A, velocidade de deposição de 115 cm/mim, sem tempo de parada entre as camadas soldadas e vazão do gás argônio puro de 15 L/mim. Nesse aerofólio o excesso de deposição de material ficou evidente, as paredes ficaram mais espessas e o acabamento superficial ainda pior, dando indícios de que o a vazão de gás poderia estar sendo um problema.

Figura 4.5 – Aspecto visual superior do aerofólio do teste 05



Fonte: próprio autor.

No teste representado pela Figura 4.6 diminuiu-se a corrente de soldagem no modo sinérgico para 75 A, aumentando a velocidade de deposição para 130 cm/min, sem pausa, e a vazão do gás de proteção para 30 L/min. Pode-se observar uma melhora substancial no acabamento superficial, no formato e espessura da parede e nos pontos de excesso de material e apagamento do arco, o que comprovou a suspeita de que a baixa vazão de gás estava sendo um problema.

Figura 4.6 – Aspecto visual superior do aerofólio do teste 06



Fonte: próprio autor.

No teste representado pela Figura 4.7 reduziu-se a corrente de soldagem no modo sinérgico para 70 A e a velocidade de deposição para 125 cm/min, sem tempo de parada, e manteve-se a vazão de gás em 30 L/min. Observou-se um resultado ainda melhor em todos os aspectos em comparação com a Figura 4.6, mostrando que a diminuição da corrente foi uma boa escolha.

Figura 4.7 – Aspecto visual superior do aerofólio do teste 07



Fonte: próprio autor.

Em momento posterior foram realizados cinco novos testes, nos quais alterou-se a velocidade de deposição e a corrente de soldagem no modo sinérgico, uma vez que, através dos testes anteriores, já era conhecida uma faixa viável para a variação desses parâmetros e a vazão de gás já havia sido estabelecida em 30 L/min. Para evitar o desperdício de arame optou-se por continuar realizando os testes com poucas camadas. A Tabela 4.2 evidencia os parâmetros variados nesses testes.

Tabela 4.2 – Parâmetros variados nos cinco testes seguintes

Teste	Corrente no modo sinérgico [A]	Velocidade de Deposição [cm/min]	Vazão de Gás [L/min]	Tempo de parada [s]
8	80	80	30	Sem
9	80	100	30	Sem
10	75	150	30	Sem
11	75	120	30	Sem
12	70	120	30	Sem

Fonte: próprio autor.

No teste representado pela Figura 4.8 utilizou-se velocidade de deposição de 80 cm/min e corrente de soldagem no modo sinérgico de 80 A. Esses parâmetros resultaram em alta porosidade, cordão de solda espesso e acabamento superficial ruim, sendo possível, também, observar deposição excessiva de material no bordo de fuga do aerofólio.

Figura 4.8 – Aspecto visual superior do aerofólio do teste 08



Fonte: próprio autor.

No teste representado pela Figura 4.9 utilizou-se velocidade de deposição de 100 cm/min e corrente de soldagem no modo sinérgico de 80 A. Esses parâmetros resultaram em cordão de solda espesso e não uniforme, menor porosidade, porém, acabamento superficial ainda pior, notando-se, também, que no bordo de fuga do aerofólio o excesso de material depositado persistiu.

Figura 4.9 – Aspecto visual superior do aerofólio do teste 09



Fonte: próprio autor.

No teste representado pela Figura 4.10 utilizou-se velocidade de deposição de 150 cm/min e corrente de soldagem no modo sinérgico de 75 A. Esses parâmetros acarretaram a redução da espessura do cordão de solda e da deposição excessiva de material no bordo de fuga do aerofólio. Todavia o acabamento superficial ainda se mostrava não satisfatório.

Figura 4.10 – Aspecto visual superior do aerofólio do teste 10



Fonte: próprio autor.

No teste representado pela Figura 4.11 foi utilizado velocidade de deposição de 120 cm/min e corrente de soldagem no modo sinérgico de 75 A. Observou-se uma melhora significativa no acabamento superficial, na espessura do cordão de solda e na porosidade em relação ao teste anterior.

Figura 4.11 – Aspecto visual superior do aerofólio do teste 11



Fonte: próprio autor.

No teste representado pela Figura 4.12 utilizou-se velocidade de deposição de 120 cm/min e corrente de soldagem no modo sinérgico de 70 A. Obtendo, assim, acabamento superficial, porosidade, espessura e aspecto de parede, satisfatórios.

Figura 4.12 – Aspecto visual superior do aerofólio do teste 12



Fonte: próprio autor.

Em seguida, com os parâmetros velocidade de deposição fixada em 120 cm/min, corrente de soldagem no modo sinérgico fixada em 70 A e vazão do gás de proteção fixada em 30 L/min, foram realizados quatro testes que contaram com mais camadas. Esses testes tinham como objetivo verificar o comportamento do processo e da estrutura conforme o número de camadas iria aumentando.

Observou-se o surgimento de um novo problema, o arco estava se apagando quando a tocha chegava perto do bordo de fuga do aerofólio, no início da trajetória, o

que ocasionava, sobretudo, deposição excessiva de material na ponta do bordo de fuga. Esse problema é evidenciado nas Figuras 4.13 e 4.14.

Figura 4.13 – Aspecto visual lateral dos testes 13, 14, 15 e 16



Fonte: próprio autor.

Figura 4.14 – Aspecto visual superior do bordo de fuga dos testes 13, 14, 15 e 16

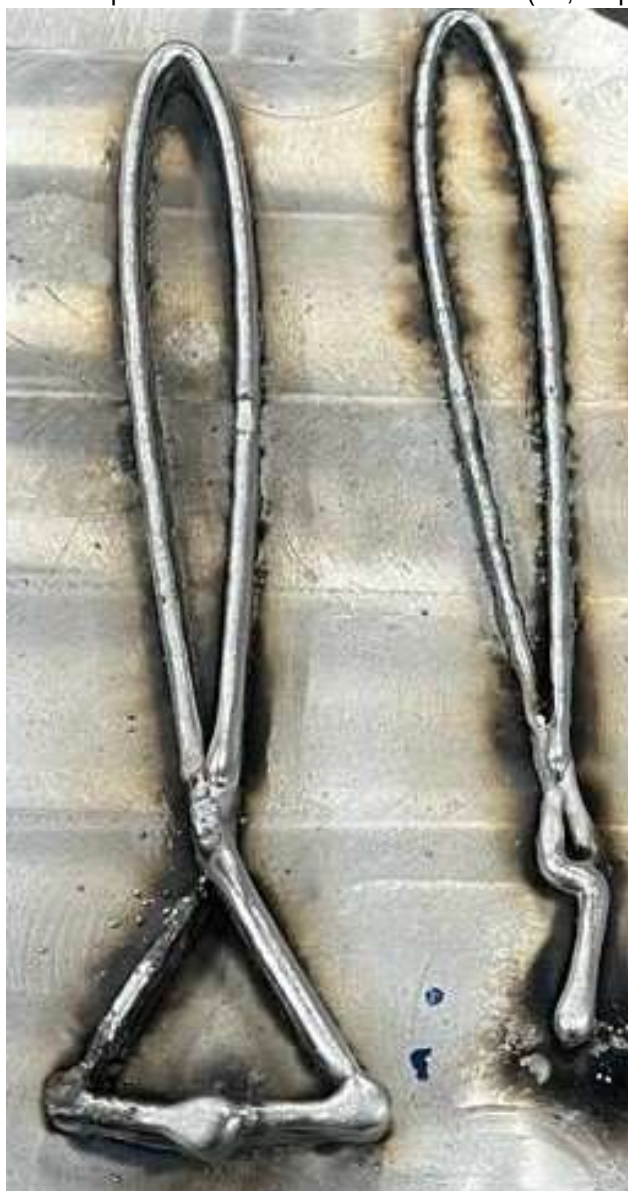


Fonte: próprio autor.

A primeira ideia para solucionar esse problema foi a elaboração de um novo design para o aerofólio, uma vez que se suspeitava que a geometria do bordo de fuga estava afetando na manutenção do arco aceso. Sendo assim, foram realizados dois novos testes, 17 (T1) e 18 (T2), com geometrias distintas. O pedaço que não fazia parte do design original do aerofólio seria retirado posteriormente por meio do processo de usinagem.

O resultado, evidenciado na Figura 4.15, não foi o esperado, sendo que o bordo de fuga não se mostrou adequado para passar por um processo de usinagem posteriormente.

Figura 4.15 – Aspecto visual superior dos aerofólios dos testes 17 (T1, esquerda) e 18 (T2, direita)



Fonte: próprio autor.

A velocidade que vinha sendo empregada era de 120 cm/min sendo igual em todos os 215 pontos. Logo, a ideia seguinte foi utilizar velocidades diferentes em pontos estratégicos com o intuito de eliminar o apagamento do arco e a deposição excessiva de material em certas partes. Verificou-se, no desenho e no programa, que a região onde o arco se apagava frequentemente estava entre os pontos 160 e 169, sendo estes o foco das alterações de velocidade. Foram, então, realizados sete testes, os quais são mostradas nas Figuras 4.16 e 4.17.

Figura 4.16 – Aspecto visual superior dos aerofólios dos testes 19 (T3), 20 (T4), 21 (T5), 22 (T6), 23 (T7), 24 (T8) e 25 (T9)



Fonte: próprio autor.

Figura 4.17 – Aspecto visual superior e lateral dos aerofólios dos testes 19 (T3), 20 (T4), 21 (T5), 22 (T6), 23 (T7), 24 (T8) e 25 (T9)



Fonte: próprio autor.

A distribuição dos pontos no aerofólio está evidenciada na Figura 4.18.

As tabelas 4.3, 4.4 e 4.5 mostram a variação da velocidade de deposição em cada conjunto de pontos dos aerofólios dos sete testes finais.

Tabela 4.3 – Velocidade de deposição nos pontos 1 a 110 dos aerofólios dos testes 19 a 25

Testes	Velocidade de deposição nos pontos 1 ao 5 (cm/min)	Velocidade de deposição nos pontos 6 ao 11 (cm/min)	Velocidade de deposição nos pontos 12 ao 69 (cm/min)	Velocidade de deposição nos pontos 70 ao 110 (cm/min)
19 (T3)	200	150	120	120
20 (T4)	250	175	120	120
21 (T5)	250	200	120	120
22 (T6)	250	200	120	150
23 (T7)	250	200	120	150
24 (T8)	250	200	120	150
25 (T9)	250	200	120	150

Fonte: próprio autor.

Tabela 4.4 – Velocidade de deposição nos pontos 111 a 189 dos aerofólios dos testes 19 a 25

Testes	Velocidade de deposição nos pontos 111 ao 159 (cm/min)	Velocidade de deposição nos pontos 160 ao 169 (cm/min)	Velocidade de deposição nos pontos 170 ao 175 (cm/min)	Velocidade de deposição nos pontos 176 ao 189 (cm/min)
19 (T3)	120	40	120	120
20 (T4)	120	140	120	200
21 (T5)	120	110	120	250
22 (T6)	120	100	250	250
23 (T7)	120	50	250	250
24 (T8)	120	75	120	150
25 (T9)	120	85	120	150

Fonte: próprio autor.

Tabela 4.5 – Velocidade de deposição nos pontos 190 a 215 dos aerofólios dos testes 19 a 25

Testes	Velocidade de deposição nos pontos 190 ao 196 (cm/min)	Velocidade de deposição nos pontos 197 ao 200 (cm/min)	Velocidade de deposição nos pontos 201 ao 211 (cm/min)	Velocidade de deposição nos pontos 212 ao 215 (cm/min)
19 (T3)	200	200	120	120
20 (T4)	200	200	120	120
21 (T5)	250	250	120	120
22 (T6)	250	250	120	100
23 (T7)	250	250	120	100
24 (T8)	200	250	120	100
25 (T9)	200	250	120	100

Fonte: próprio autor.

Ao finalizar essa etapa de testes observou-se um resultado satisfatório visto que no teste 25 (T9) foram solucionados os problemas de apagamento do arco e da deposição excessiva de material no bordo de fuga.

4.2 Confeção e análise dimensional dos aerofólios

Com o intuito de comprovar que o conjunto de parâmetros encontrados nos testes preliminares poderiam gerar um componente de qualidade fabricado pelo processo MADA, realizou-se a confecção de três estruturas com 100 camadas sem parada entre as camadas, sendo estas sobrepostas. Entre cada estrutura foi feita uma parada de 60 segundos e o resultado está evidenciado na Figura 4.18.

Figura 4.18 – Aerofólio com 300 camadas



Fonte: próprio autor.

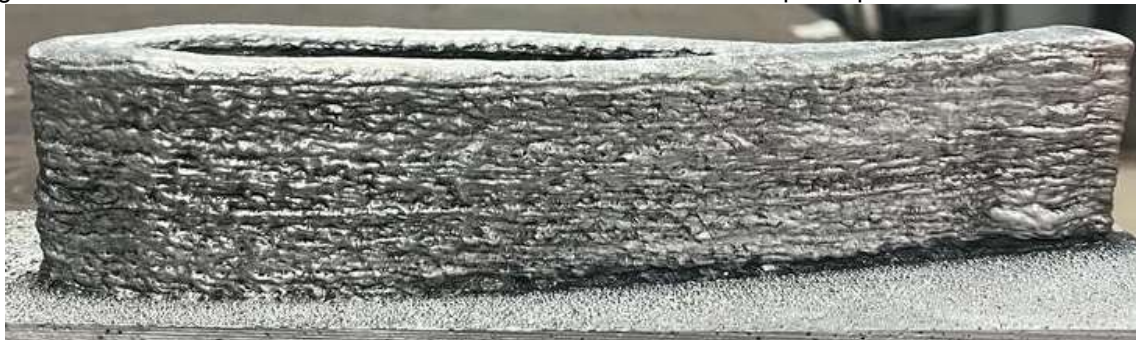
Após a confecção do aerofólio da Figura 4.18 o rolo de arame de alumínio ER4043 que vinha sendo utilizado acabou. Foi necessário, então, realizar a compra de um novo rolo arame do mesmo material com o mesmo diâmetro de 1,2 mm, porém de outro fabricante.

Esse contratempo ocasionou algumas mudanças não esperadas na confecção dos dois aerofólios de 100 camadas, um sem parada e o outro parada de 30 segundos, que iriam ser confeccionados. Esses aerofólios foram fabricados com o intuito de comparar o tempo gasto na fabricação, a altura, a espessura, a porosidade e o acabamento superficial.

O primeiro a ser fabricado foi o aerofólio com 100 camadas sem tempo de parada entre as camadas. O tempo de fabricação desse aerofólio foi de 29 minutos. A vazão do gás de proteção foi mantida em 30 L/min e a configuração de velocidades de deposição obtidas através do teste 25 (T9) também se manteve. A Distância entre o Bico de Contato e a Peça (DBCP) foi mantida em 18 mm e o GAP de subida em 0,5 mm. A corrente de soldagem no modo sinérgico teve que ser alterada para 75 A uma vez que utilizando 70 A o arco não se manteve estável.

Como se pode observar nas Figuras 4.19, 4.20 e 4.21 ocorreu uma piora substancial no acabamento superficial e na qualidade da solda, ficando o aerofólio com maior rugosidade e parede mais espessa em comparação com o aerofólio confeccionado com o arame anterior. Houve também, como se pode observar nos substratos, uma quantidade excessiva de respingos, o que não ocorria antes.

Figura 4.19 – Vista lateral 1 do aerofólio com 100 camadas sem tempo de parada entre cada camada



Fonte: próprio autor.

Figura 4.20 – Vista lateral 2 do aerofólio com 100 camadas sem tempo de parada entre cada camada



Fonte: próprio autor.

Figura 4.21 – Vista superior do aerofólio com 100 camadas sem tempo de parada entre cada camada



Fonte: próprio autor.

Em seguida foi fabricado o aerofólio com 100 camadas com tempo de parada de 30 segundos entre as camadas. O tempo de fabricação desse aerofólio foi de 1 hora e 24 minutos. A vazão do gás de proteção foi mantida em 30 L/min e a configuração de velocidades de deposição obtidas através do teste 25 (T9) também se manteve. A Distância entre o Bico de Contato e a Peça (DBCP) foi mantida em 18 mm e o GAP de subida em 0,5 mm. A corrente de soldagem no modo sinérgico teve que ser alterada para 75 A uma vez que utilizando 70 A o arco não se manteve estável.

Como se pode observar nas Figuras 4.22, 4.23 e 4.24 a parede ficou mais fina, o acabamento superficial piorou, a qualidade da solda caiu e a rugosidade das paredes aumentaram, ao se comparar com o aerofólio sem parada. Houve pontos de deposição excessiva de material e um ponto em que o arco se apagou, causando um grave defeito na peça.

Figura 4.22 – Vista lateral 1 do aerofólio com 100 camadas com tempo de parada de 30 segundos entre cada camada



Fonte: próprio autor.

Figura 4.23 – Vista lateral 2 do aerofólio com 100 camadas com tempo de parada de 30 segundos entre cada camada



Fonte: próprio autor.

Figura 4.24 – Vista superior do aerofólio com 100 camadas com tempo de parada de 30 segundos entre cada camada



Fonte: próprio autor.

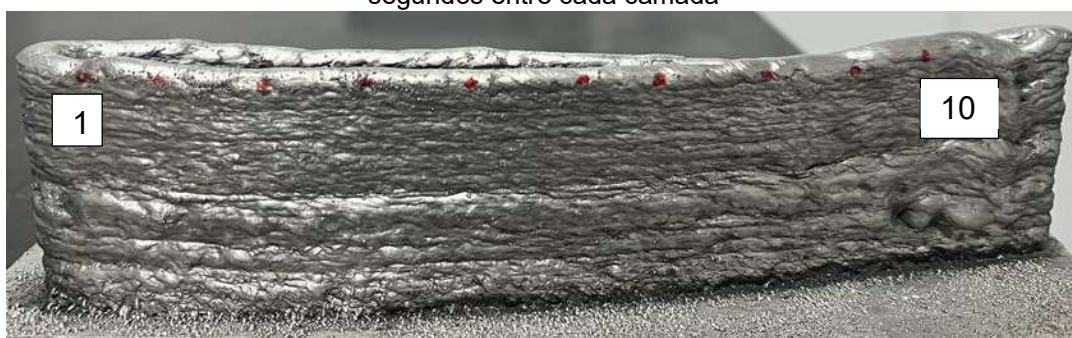
As Figuras 4.25 e 4.26 mostram a distribuição dos pontos marcados em cada aerofólio, já a Figura 4.27 evidencia o aparato experimental elaborado para a medição da retilidade na linha de cada um desses pontos.

Figura 4.25 – Distribuição dos pontos no aerofólio com 100 camadas sem tempo de parada entre cada camada



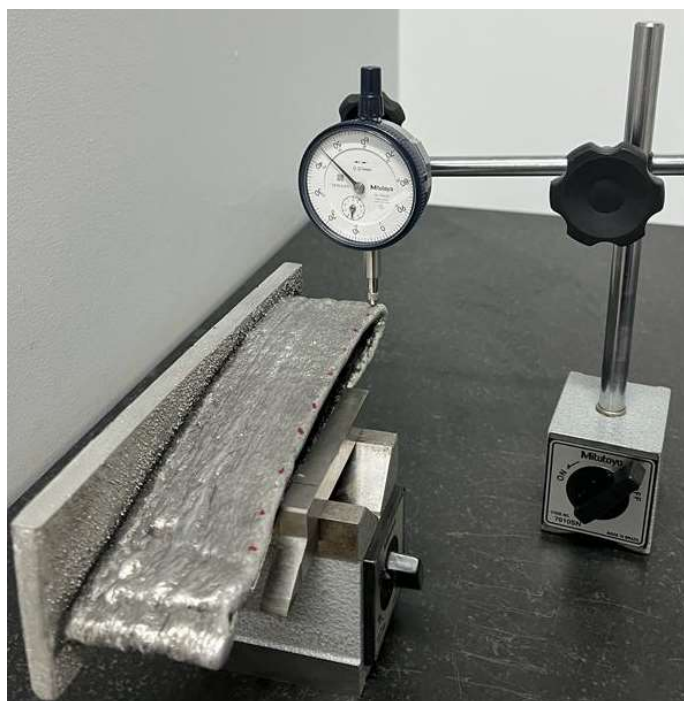
Fonte: próprio autor.

Figura 4.26 – Distribuição dos pontos no aerofólio com 100 camadas com tempo de parada de 30 segundos entre cada camada



Fonte: próprio autor.

Figura 4.27 – Aparato experimental para medição da retilidade em cada ponto marcado no aerofólio



Fonte: próprio autor.

Os resultados obtidos com as medições estão dispostos na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 – Resultados obtidos com as medições de altura, largura e retilineidade em cada ponto dos dois aerofólios

Pontos	com parada			sem parada		
	Altura (mm)	Largura (mm)	Retilineidade (mm)	Altura (mm)	Largura (mm)	Retilineidade (mm)
1	45,38	5,32	1,48	42,36	7,08	1,26
2	45,78	5,18	1,45	41,24	7,06	1,32
3	45,74	5,04	1,28	41,30	7,10	1,20
4	45,54	5,44	1,21	41,02	7,26	1,02
5	44,82	5,72	1,20	40,20	7,08	1,07
6	44,64	5,50	1,26	39,98	7,02	1,04
7	44,62	5,42	1,02	39,80	6,94	0,97
8	44,88	6,22	1,31	40,46	7,02	0,89
9	45,84	5,38	1,34	40,60	7,30	0,99
10	47,50	6,40	1,62	41,28	8,34	1,06
Média	45,47	5,56	1,32	40,82	7,22	1,08
Desvio Padrão	0,86	0,44	0,17	0,77	0,41	0,14

Fonte: próprio autor.

Para o aerofólio com 100 camadas com tempo de parada de 30 segundos entre cada camada obteve-se, nos pontos marcados, altura média com desvio padrão de $(45,47 \pm 0,86)$ mm, largura média com desvio padrão de $(5,56 \pm 0,44)$ mm e retilineidade média com desvio padrão de $(1,32 \pm 0,17)$ mm.

Para o aerofólio com 100 camadas sem tempo de parada entre cada camada obteve-se, nos pontos marcados, altura média com desvio padrão de $(40,82 \pm 0,77)$ mm, largura média com desvio padrão de $(7,22 \pm 0,41)$ mm e retilineidade média com desvio padrão de $(1,08 \pm 0,14)$ mm.

Foi possível observar que o aerofólio confeccionado com parada possui altura média maior e largura média menor que o aerofólio sem parada, no entanto o acabamento superficial deste foi superior ao daquele, pois obteve valor médio de retilineidade menor.

A altura que ambos os aerofólios atingiram foi inferior ao esperado, uma vez que o GAP de subida pré-estabelecido foi de 0,5 mm por camada, sendo a altura

esperada para 100 camadas de 50 mm. O aerofólio com parada chegou mais perto desse valor, mesmo assim ficou quase 5 mm menor.

A largura das paredes do aerofólio sem parada se mostrou elevada, sendo um dos motivos que o fez reduzir em altura. Como o aerofólio com parada obteve paredes mais finas isso possibilitou o aumento de sua altura.

Quanto ao acabamento superficial o aerofólio sem parada obteve melhor resultado uma vez que, na média, ficou com 0,24 mm a menos de retilidade do que o aerofólio com parada.

A Figura 4.28 mostra a localização do corte realizado no bordo de ataque dos aerofólios com 100 camadas.

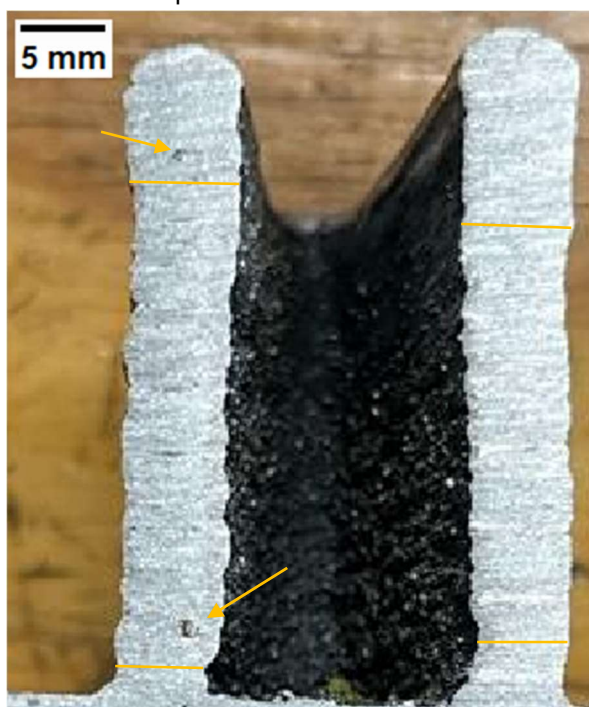
Figura 4.28 – Localização do corte nos aerofólios



Fonte: próprio autor

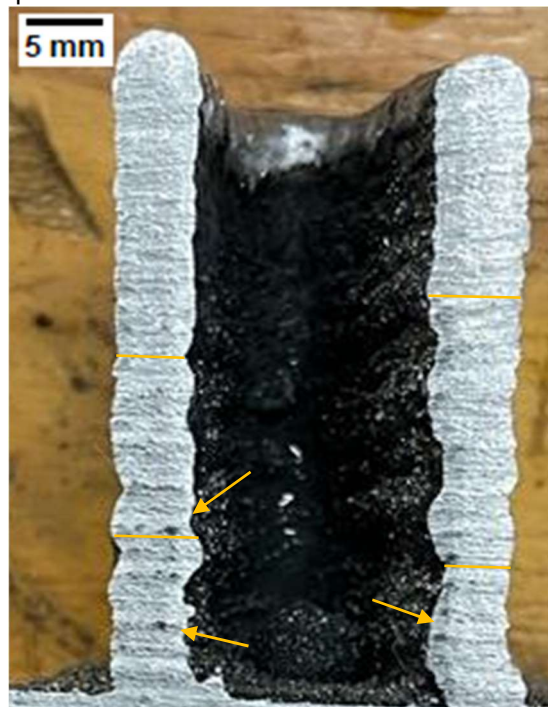
A parte interna do corte está representado nas Figuras 4.29 e 4.30.

Figura 4.29 – Vista interna do corte feito no aerofólio sem parada



Fonte: próprio autor.

Figura 4.30 – Vista interna do corte feito no aerofólio com parada



Fonte: próprio autor.

A tabela 4.7 mostra a variação da largura na seção transversal do corte. A localização das medições está representada pelos segmentos de reta amarelos presentes nas Figuras 4.29 e 4.30.

Tabela 4.7 – Variação da largura das paredes na seção transversal do corte

Ponto	Com parada		Sem parada	
	Parede da direita	Parede da esquerda	Parede da direita	Parede da esquerda
Maior largura (mm)	6,39	5,72	6,91	6,75
Menor largura (mm)	4,37	4,38	5,34	5,34

Fonte: próprio autor.

Por meio das setas amarelas presentes nas Figuras 4.29 e 4.30 foi possível visualizar a existência de uma maior quantidade de poros nas paredes do aerofólio com tempo de parada entre camadas. Uma análise microscópica como a mostrada pela Figura 2.5 [28] seria capaz de evidenciar a existência de ainda mais poros, e comprovar a problemática da porosidade nas peças de alumínio fabricadas pelo processo MADA.

Analisando as espessuras mostradas na Tabela 4.7 o aerofólio sem parada apresentou paredes mais uniformes, variando menos ao longo da vertical, porém mais espessas, já o aerofólio com parada apresentou paredes menos espessas, porém menos uniformes, variando mais ao longo da vertical.

Diante da problemática do acabamento superficial foi possível comprovar a fala de DebRoy, T. et al [10], uma vez que a rugosidade superficial das peças produzidas em MADA foi alta, havendo a necessidade de uma etapa de usinagem após a fabricação. Ele também afirmou assertivamente que os parâmetros do processo MADA, como entrada de calor, velocidade de deposição e altura da camada afetam a rugosidade da superfície.

Os resultados obtidos nos testes preliminares puderam confirmar que, como disse Yehorov, Y. et al [15], a rugosidade superficial das paredes de liga Al-Mg feitas por MADA baseado em GMAW depende de uma faixa específica de velocidade de soldagem, sendo que se a velocidade de deposição for baixa, a rugosidade da superfície e o custo de produção aumentam. Por outro lado, se a velocidade de deposição for muito alta, as lombadas, e vales se formam sobre as camadas, uma vez que o arco fica instável.

A questão da porosidade, evidenciada nas Figuras 4.29 e 4.30, é explicada por Paula, R. G. et al [27] que afirma que no processo MADA utilizando ligas de alumínio a alta refletividade e a alta condutividade térmica levam à rápida dissipação de calor e a grande solubilidade do hidrogênio no alumínio líquido, acarretando a formação de poros e a oxidação da superfície do material devido à formação de Al_2O_3 . Gu, J. et al [28] complementa a explicação dizendo que certa quantidade de hidrogênio é necessária para nuclear as bolhas geradas na poça de fusão e que quando o teor de hidrogênio excede o nível exigido surgem poros, que levam à baixa resistência mecânica do componente fabricado.

5 CONCLUSÕES

A programação das trajetórias do aerofólio NACA4 por meio dos softwares RoboDK e Autodesk Inventor CAD 3D e do controlador DX100 do robô Yaskawa Motoman HP20D-A80, se mostrou satisfatória, uma vez que foi possível a realização do processo de manufatura aditiva por deposição a arco com excelência.

A parametrização da confecção do aerofólio pelo processo MADA realizada através dos testes preliminares mostrou que a configuração das velocidades de deposição, a corrente de soldagem no modo sinérgico e a vazão do gás de proteção influenciam significativamente na altura, largura, porosidade e acabamento superficial.

A análise dimensional dos aerofólios fabricados com 100 camadas sem tempo de parada entre cada camada e com tempo de parada de 30 segundos entre cada camada mostrou que este possuía maior altura, paredes mais finas, porém menos uniformes, maior porosidade e acabamento superficial pior em relação àquele. No aerofólio com parada houve pontos de deposição excessiva de material e pontos de apagamento do arco de soldagem, o que não ocorreu no aerofólio sem parada. O tempo de fabricação do aerofólio sem parada foi 34,52% do tempo de fabricação do aerofólio com parada, mostrando que, do ponto de vista industrial, a parada atrapalharia a produtividade.

O processo de fabricação manufatura aditiva por deposição a arco utilizando alumínio se mostrou eficiente e promissor, sendo necessário cada vez mais trabalhos como este para que essa tecnologia se desenvolva e amadureça, podendo, em breve ser utilizada em larga escala na indústria.

6 TRABALHOS FUTUROS

Em função dos resultados obtidos, sugere-se como trabalhos futuros:

- Analisar a composição química dos aerofólios confeccionados com os arames de fabricantes diferentes.
- Analisar a microestrutura e realizar ensaios mecânicos nos aerofólios com parada e sem parada.
- Parametrizar o início e o término da soldagem nas camadas no processo com parada.

REFERÊNCIAS

- [1] NGO, T. D. KASHANI, A. IMBALZANO, G. NGUYEN, K. T. Q. HUI, D. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. **Composites Part B: Engineering**. 2018, Vol.143, p.172-196.
- [2] Additive manufacturing - General principles - Terminology (ISO/ASTM 52900:2015) 2015.
- [3] S. Reddy et al., "A new approach for attaining uniform properties in build direction in additive manufactured components through coupled thermal-hardness model," **Journal of Manufacturing Processes**, vol. 40, pp. 46-58, 2019.
- [4] T. J. Horn and O. L. Harrysson, "Overview of current additive manufacturing technologies and selected applications," **Science progress**, vol. 95, no. 3, pp. 255-282, 2012.
- [5] GHARAGOZLOO, Mehdi. Development of parameters of GMAW-P for the wire and arc additive manufacturing (WAAM) of aluminum alloys. 2020. Tese de Doutorado. **École de Technologie Supérieure**.
- [6] WILLIAMS, S.; MARTINA, F. Wire+ arc additive manufacturing vs. traditional machining from solid: a cost comparison. **[S.I.]**,2015.
- [7] A. A. Uгла, H. J. Khoudair, and A. R. Almusawi, "Metal Inert Gas Welding-Based Shaped Metal Deposition in Additive Layered Manufacturing: A," **World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Mechanical and Materials Engineering**, vol. 13, p. 14, 2019.
- [8] VIMAL, K. E. K. NAVEEN, M. S. SONU, R. Wire arc additive manufacturing of aluminium alloys: A review. **Materials Today: Proceedings**, 2021, Vol. 41, p. 1139-1145.
- [9] S. W. Williams, F. Martina, A. C. Addison, J. Ding, G. Pardal, and P. Colegrove, "Wire+ arc additive manufacturing," **Materials Science and Technology**, vol. 32, no. 7, pp. 641-647, 2016.

- [10] T. DebRoy et al., "Additive manufacturing of metallic components—process, structure and properties," **Progress in Materials Science**, vol. 92, pp. 112-224, 2018.
- [11] S. A. Vendan, L. Gao, A. Garg, P. Kavitha, G. Dhivyasri, and S. Rahul, "Welding an Overview," in **Interdisciplinary Treatment to Arc Welding Power Sources**: Springer, 2019, pp. 1-14.
- [12] J. Metcalfe and M. Quigley, "Keyhole stability in plasma arc welding," **Welding Journal**, vol. 54, no. 11, p. 401, 1975.
- [13] M. Singla, D. Singh, and D. Deepak, "Parametric optimization of gas metal arc welding processes by using factorial design approach," **Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering**, vol. 9, no. 04, p. 353, 2010.
- [14] D. Jafari, T. H. J. Vaneker and I. Gibson, "Wire and arc additive manufacturing: Opportunities and challenges to control the quality and accuracy of manufactured parts," **Materials and Design**. 202 (2021).
- [15] Y. Yehorov, L. J. da Silva, and A. Scotti, "Balancing WAAM Production Costs and Wall Surface Quality through Parameter Selection: A Case Study of an Al-Mg5 Alloy Multilayer-Non-Oscillated Single Pass Wall," **Journal of Manufacturing and Materials Processing**, vol. 3, no. 2, p. 32, 2019
- [16] C. Li, Z. Liu, X. Fang, and Y. Guo, "Residual stress in metal additive manufacturing," **Procedia Cirp**, vol. 71, pp. 348-353, 2018.
- [17] LI, F.; CHEN, S.; SHI, J.; ZHAO, Y.; TIAN, H. Thermoelectric cooling-aided bead geometry regulation in wire and arc-based additive manufacturing of thin-walled structures. **Applied Sciences, Multidisciplinary Digital Publishing Institute**, vol. 8, no. 2, p. 207, 2018.
- [18] MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. **Soldagem fundamentos e tecnologia**. atual. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2017.
- [19] FORTES, C.; VAZ, C. **Apostila de soldagem mig/mag**. ESAB, janeiro, 2005.
- [20] D. Ding, Z. Pan, D. Cuiuri, and H. Li, "Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests," **The International**

Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 81, no. 1-4, pp. 465-481, 2015.

[21] L. O. Vilarinho and A. Scotti, "An alternative algorithm for synergic pulsed GMAW of aluminium," **Australasian Welding Journal**, vol. 45, no. 2, pp. 36-44, 2000.

[22] P. Praveen, P. Yarlagadda, and M.-J. Kang, "Advancements in pulse gas metal arc welding," **Journal of Materials Processing Technology**, vol. 164, pp. 1113-1119, 2005.

[23] C. Vargel, "Corrosion of Aluminium". **Elsevier**, vol 1, (2004).

[24] Y. Luo, J. Li, J. Xu, L. Zhu, J. Han, C. Zhang, Influence of pulsed arc on the metal droplet deposited by projected transfer mode in wire-arc additive manufacturing, **J. Mater. Process. Technol.** 259 (2018) 353–360.

[25] A.S. Haselhuhn, M.W. Buhr, B. Wijnen, P.G. Sanders, J.M. Pearce, Structure-property relationships of common aluminum weld alloys utilized as feedstock for GMAW-based 3-D metal printing, **Mater. Sci. Eng., A** 673 (2016) 511–523.

[26] XIONG, J.; LI, Y.; LI, R.; YIN, Z. Influences of process parameters on surface roughness of multi-layer single-pass thin-walled parts in gmaw-based additive manufacturing. *Journal of Materials Processing Technology*, **Elsevier**, v. 252, p. 128–136, 2018.

[27] PAULA, R. G. ELISA, M. R. N. ELENA, G. Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) for Aluminum-Lithium Alloys: A Review. **Materials**. 2023, Vol. 16, p. 1375-1395.

[28] J. Gu, B. Cong, J. Ding, S. W. Williams, Y. Zhai, Wire+ arc additive manufacturing of aluminium, in: **Proceedings of the 25th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium**, Austin, TX, USA (2014) 4-6.

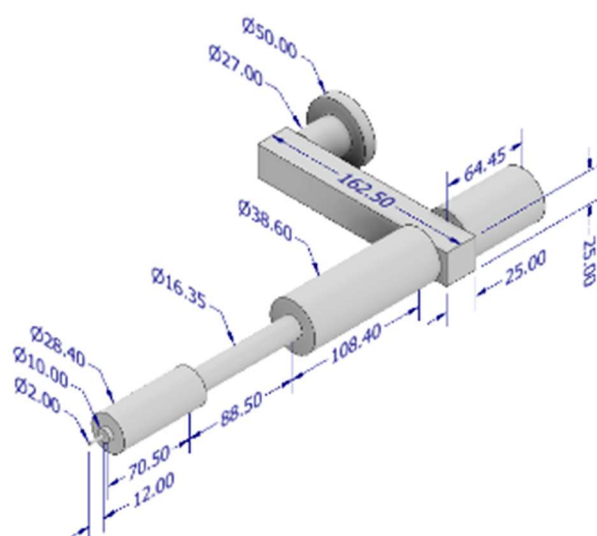
[29] C. Zhang, M. Gao, X. Zeng, Workpiece vibration augmented wire arc additive manufacturing of high strength aluminum alloy, **J. Mater. Process. Technol.** 271 (2019) 85–92.

- [30] R. Sun, L. Li, Y. Zhu, W. Guo, P. Peng, B. Cong, L. Liu, Microstructure, residual stress, and tensile properties control of wire-arc additive manufactured 2319 aluminum alloy with laser shock peening, **J. Alloy. Compd.** 747 (2018) 255–265.
- [31] B. Wu, Z. Pan, D. Ding, D. Cuiuri, H. Li, J. Xu, J. Norrish, A review of the wire arc additive manufacturing of metals: properties, defects and quality improvement, **Manuf. Process.** 35 (2018) 127–139.
- [32] Associação Brasileira de Normas Técnicas. Projeto ABNT 08;020.30-009-1: aeronáutica e espaço – vocabulário – parte 1 – aeronaves. Rio de Janeiro 2011.
- [33] Eastlake, Charles. A visão de um engenheiro aeronáutico acerca da sustentação, Bernoulli e Newton. Tradução: S. R. Dahmen. 2006, Vol. 7, no. 2, p. 53.
- [34] Airfoil Tools. Disponível em: <http://www.airfoiltools.com>. Consultado em 01 de maio de 2023.

APÊNDICE

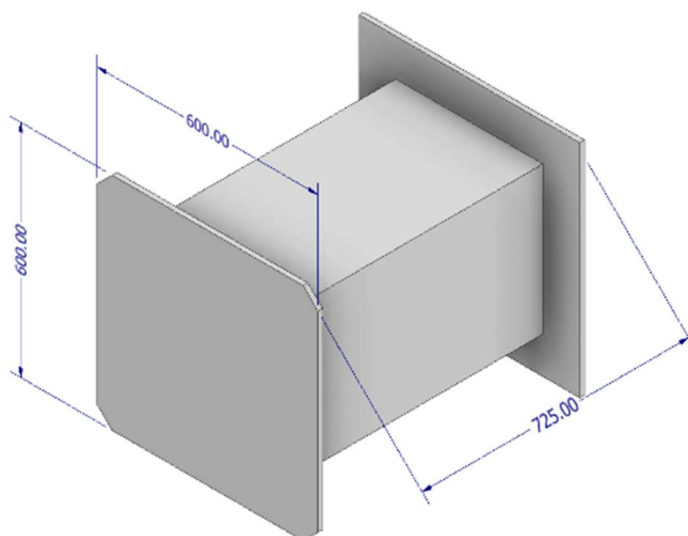
Componentes da estação de trabalho virtual desenvolvidos no software Autodesk Inventor CAD 3D

Figura 7.1 - Tocha e seu suporte dimensionados no Autodesk Inventor



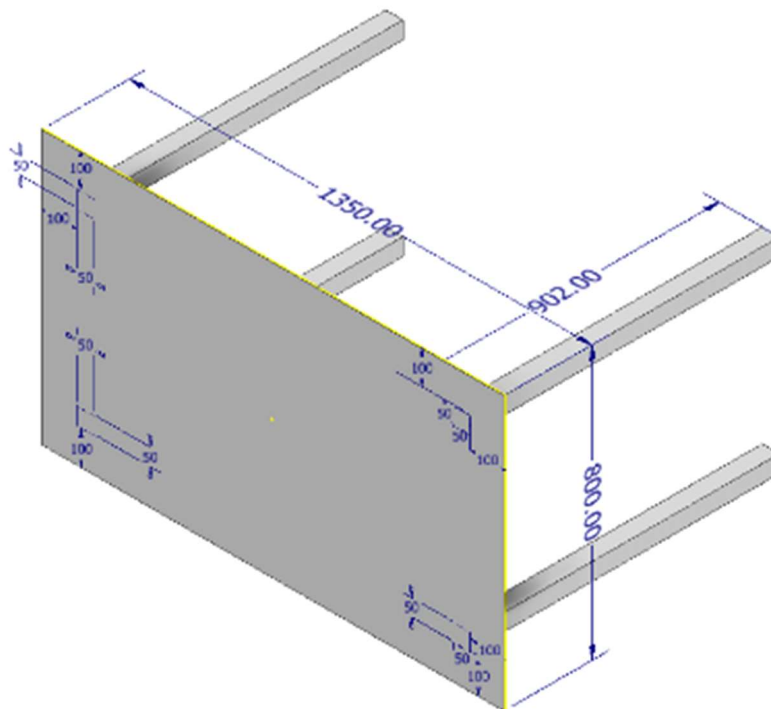
Fonte: próprio autor.

Figura 7.2 - Base do robô Yaskawa Motoman HP20D-A80 dimensionados no Autodesk Inventor



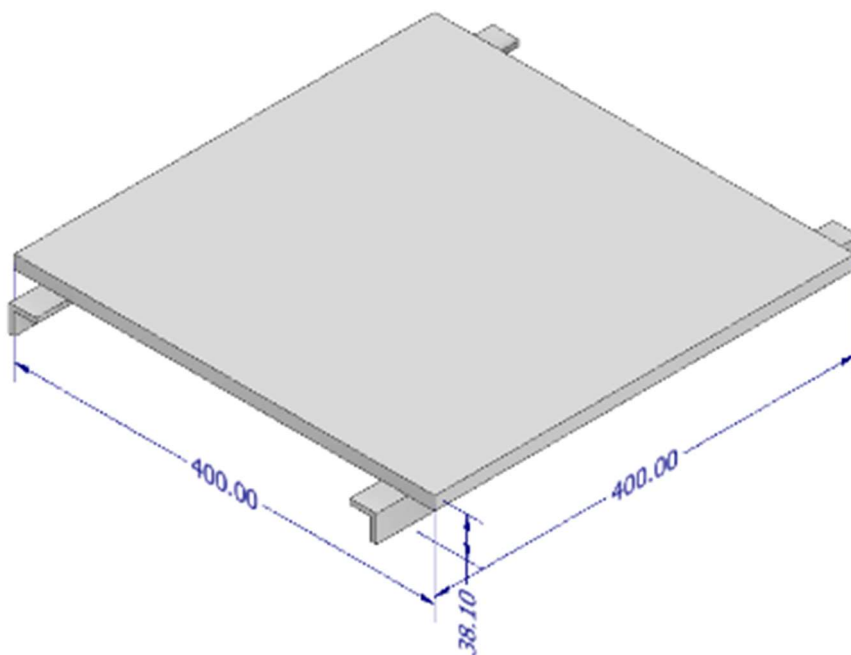
Fonte: próprio autor.

Figura 7.3 - Mesa dimensionada no Autodesk Inventor



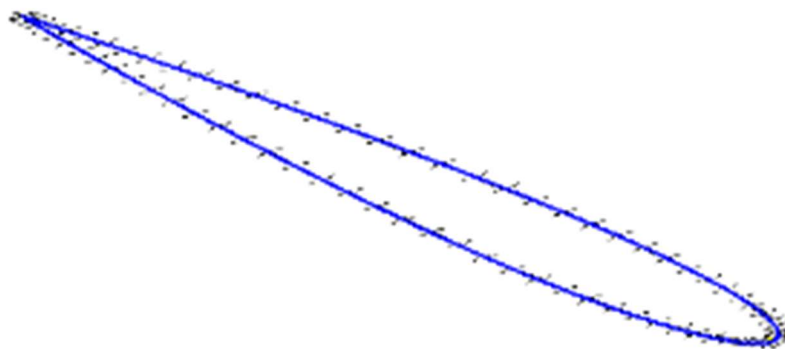
Fonte: próprio autor.

Figura 7.4 – Gabarito de fixação dimensionado no Autodesk Inventor



Fonte: próprio autor.

Figura 7.5 - Aerofólio NACA4 dimensionado no Autodesk Inventor



Fonte: próprio autor.

ANEXO



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

DECLARAÇÃO

PLANO DE TRABALHO DO PROJETO FINAL DE CURSO

Título do Trabalho

Avaliação de parâmetros e utilização do tempo de parada na qualidade construtiva de uma peça de alumínio fabricada por Manufatura Aditiva por Deposição a Arco

Orientador: Demostenes Ferreira Filho

Co-orientador: Daniel Souza

Curso

Engenharia Elétrica ()	Engenharia Mecânica (X)	Engenharia de Computação PFC 1 () PFC 2 ()
-------------------------	-------------------------	---

Dados	Discente 1
Matricula - Nome	Felipe Cardoso Tavares Silva
Telefone	(62) 983021027
E-mail	felipect@discente.ufg.br

Resumo

A Manufatura Aditiva de metais possui grande potencial de aplicação, mas diferente da impressão 3D aplicada em polímeros, que já está consolidada industrialmente, a Manufatura Aditiva e principalmente a Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA) possui muito potencial, mas necessita ainda de muito estudo para atingir a maturidade necessária para aplicações industriais. Neste sentido este projeto consiste em avaliar a influência dos parâmetros e utilização de tempo de parada intercadas no processo de fabricação de uma peça de alumínio que possui perfil complexo na fabricação pelo processo de Manufatura Aditiva por Deposição a Arco.

I. Objetivos.

Os objetivos deste projeto são:

- Avaliar a influência dos parâmetros utilizados na fabricação pelo processo MADA de uma peça com perfil relativamente complexo;
- Avaliar a influência da utilização de parada entre as camadas na fabricação de uma peça de perfil complexo pelo processo MADA.

II. Metodologia (atividades a serem desenvolvidas).

A metodologia utilizada neste projeto será:

- Revisão bibliográfica;
- Definição dos materiais e métodos utilizados;
- Parametrização do processo MADA;
- Fabricação de uma peça sem parada intercadas e uma com parada intercadas;

III. Resultados Esperados

Espera-se como resultados deste projeto:

- A avaliação do impacto dos parâmetros do processo MADA na qualidade e continuidade do material depositado;
- Avaliação da influência da utilização da parada intercada na qualidade e perfil da peça fabricada pelo processo MADA.

IV. Cronograma de Atividades

Na Tabela 1 é mostrado o Cronograma de Atividades.

Tabela 1 - Semestre letivo 2023/01

Etapas do Projeto	Abril	Maio	Junho	Julho	Agosto
1 - Revisão bibliográfica	X	X	X		
2 - Definição dos materiais e métodos	X	X			
3 - Parametrização do processo MADA	X	X	X		
4 - Avaliação da influência dos parâmetros na qualidade da peça		X	X		
5 - Fabricação de uma peça sem parada intercadas e uma com parada intercadas		X	X	X	
6 - Avaliação da influência da utilização da parada intercada na qualidade e perfil da peça fabricada pelo processo MADA			X	X	X
7 - Confeção do relatório final	X	X	X	X	X
8 - Defesa do Projeto Final de Curso					X



Documento assinado eletronicamente por **Demóstenes Ferreira Filho, Professor do Magistério Superior**, em 26/04/2023, às 11:33, 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 26/04/2023, às 13:09, 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 **Felipe Cardoso Tavares Silva, Discente**, em 27/04/2023, às 16:31, 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_externo=0, informando o código verificador **3700951** e o código CRC **559D143B**.