

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
SANTA CATARINA - CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE METAL MECÂNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECATRÔNICA**

EDUARDO COSTA KUNER

**Integração de Software CAM em Célula Robotizada para Manufatura Aditiva
Metálica**

FLORIANÓPOLIS, 2026

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
SANTA CATARINA - CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE METAL MECÂNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECATRÔNICA**

EDUARDO COSTA KUNER

**Integração de Software CAM em Célula Robotizada para Manufatura Aditiva
Metálica**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Mecatrônico

Orientador:
Prof. Erwin Werner Teichmann, Dr. Eng.

FLORIANÓPOLIS, 2026

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor.

Kuner, Eduardo Costa

**Integração de Software CAM em Célula Robotizada para
Manufatura Aditiva Metálica / Eduardo Costa Kuner; orientação
de Erwin Werner Teichmann. - Florianópolis, SC,
2026.
81 p.**

**Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Instituto Federal
de Santa Catarina, Câmpus Florianópolis. Bacharelado
em Engenharia Mecatrônica. Departamento
Acadêmico de Metal Mecânica.
Inclui Referências.**

**1. WAAM. 2. Robótica industrial. 3. Pós-processador.
4. Sistema robótico cooperativo. 5. GMAW. I. Teichmann,
Erwin Werner. II. Instituto Federal de Santa Catarina.
III. Integração de Software CAM em Célula Robotizada
para Manufatura Aditiva Metálica.**

INTEGRAÇÃO DE SOFTWARE CAM EM CÉLULA ROBOTIZADA PARA MANUFATURA ADITIVA METÁLICA

EDUARDO COSTA KUNER

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título de Engenheiro Mecatrônico e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso de Engenharia Mecatrônica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Florianópolis, 9 de julho, 2026.

Banca Examinadora:

Erwin Werner Teichmann, Dr. Eng.
Instituto Federal de Santa Catarina - IFSC

Nelso Gauze Bonacorso, Dr. Eng.
Instituto Federal de Santa Catarina - IFSC

Eduardo Poletti, Eng.
Comac Indústria e Comércio de Automação e Robótica Ltda

Dedico este trabalho ao garoto de 16 anos que entrou no curso sonhando em trabalhar com robôs e não fazia ideia dos desafios que iria encontrar.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço à minha família por me proporcionar a educação que tive e, assim, oferecer a base que me auxiliou durante o curso. Em seguida, agradeço à minha companheira, Elisa, que esteve ao meu lado ao longo dos anos de curso e segue sendo minha principal motivação para evoluir. Também agradeço aos professores do IFSC que fizeram parte da minha jornada, especialmente ao Prof. Erwin, que me acompanhou de perto nesse trajeto final e me proporcionou imensas oportunidades. Agradeço também pelo companheirismo e apoio de meus colegas, com quem pude dividir muitos bons momentos. Agradeço à Infineon Technologies Austria por toda a experiência adquirida durante meu estágio, que me impulsionou na etapa final do curso e reforçou meu objetivo de retornar à Europa. Por fim, agradeço à Lincoln por me proporcionar uma bolsa de pesquisa, durante a qual adquiri experiência valiosa para a realização deste trabalho, à Finep por possibilitar a aquisição dos equipamentos utilizados no laboratório de automação da soldagem e à Comac pelo suporte técnico prestado.

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento e a validação de um fluxo digital para integrar o sistema de manufatura auxiliada por computador (*Computer-Aided Manufacturing*, CAM) *ENCY* a uma célula de manufatura aditiva por arco e arame (*Wire Arc Additive Manufacturing*, WAAM) composta por dois robôs industriais de baixo custo com controladores *Betrun*. O estudo teve como objetivo permitir o planejamento, a simulação e a execução de trajetórias de deposição, superando a ausência de um pós-processador comercial e a utilização de arquivos proprietários em formato binário. Adotou-se uma metodologia incremental, que envolveu a modelagem da célula virtual, a calibração dos modelos cinemáticos dos manipuladores, o desenvolvimento de um pós-processador personalizado, a implementação de um compilador para os arquivos do controlador e a exploração de estratégias de deposição com um robô reorientando o substrato e o outro depositando material. A calibração geométrica do modelo cinemático, realizada com 31 pontos de teste por robô, reduziu o erro máximo dos modelos dos robôs soldador e manipulador de 4,751 mm para 0,034 mm e para menos de 0,001 mm, respectivamente. O fluxo desenvolvido converteu os dados de trajetória gerados no ambiente CAM em programas executáveis na célula física e possibilitou a fabricação de duas geometrias: um corpo de prova prismático, com dimensões de $30 \times 30 \times 2$ mm e substrato em posição fixa, e peças helicoidais com distância máxima entre hélices de 200 mm, fabricadas com reorientação do substrato pelo robô manipulador. As peças foram fabricadas por soldagem a arco com gás de proteção (*Gas Metal Arc Welding*, GMAW), utilizando arame de aço AWS ER70S-6 de diâmetro 1,0 mm como material de adição, chapas de aço ASTM A36 de 1/4 pol como substrato e mistura de 75% de Ar (argônio) e 25% de CO₂ (dióxido de carbono) como gás de proteção. O corpo de prova prismático apresentou erros absolutos de 1,07 mm na largura, 0,80 mm no comprimento e 0,36 mm na altura. Nas peças helicoidais, a revisão das trajetórias e dos parâmetros de soldagem reduziu o excesso de espessura e os defeitos superficiais, embora tenham permanecido desvios geométricos e de posicionamento. Conclui-se que a integração realizada é funcional e cria uma plataforma para futuras pesquisas de manufatura aditiva metálica. No entanto, sua operação ainda depende de conhecimento especializado e de melhorias na calibração da célula, sobretudo no posicionamento relativo dos robôs, cujo erro residual máximo foi de $\pm 13,973$ mm, bem como no planejamento das trajetórias e na configuração das ferramentas.

Palavras-chave: WAAM; robótica industrial; pós-processador; sistema robótico cooperativo; GMAW.

ABSTRACT

This work presents the development and validation of a digital workflow for integrating the ENCY computer-aided manufacturing (CAM) system into a wire arc additive manufacturing (WAAM) cell composed of two low-cost industrial robots equipped with Betrun controllers. The study aimed to enable the planning, simulation, and execution of deposition paths while overcoming the lack of a commercial postprocessor and the use of proprietary files in binary format. An incremental methodology was adopted, involving the modeling of the virtual cell, the calibration of the manipulators' kinematic models, the development of a customized postprocessor, the implementation of a compiler for the controller files, and the exploration of deposition strategies with one robot reorienting the substrate and the other depositing material. The geometric calibration of the kinematic model, performed using 31 test points for each robot, reduced the maximum error of the welder and manipulator robot models from 4.751 mm to 0.034 mm and to less than 0.001 mm, respectively. The developed workflow converted the path data generated in the CAM environment into programs executable by the physical cell and enabled the manufacturing of two geometries: a prismatic testpiece, with dimensions of $30 \times 30 \times 2$ mm and a fixed substrate position, and helical parts with a maximum distance of 200 mm between blades, manufactured with substrate reorientation by the manipulator robot. The parts were manufactured using gas metal arc welding (GMAW), with AWS ER70S-6 steel wire of 1.0 mm diameter as filler material, ASTM A36 steel plates of 1/4 in as substrate, and a shielding gas mixture of 75% Ar (argon) and 25% CO₂ (carbon dioxide). The prismatic testpiece exhibited absolute errors of 1.07 mm in width, 0.80 mm in length, and 0.36 mm in height. For the helical parts, revising the paths and welding parameters reduced excessive thickness and surface defects, although geometric and positioning deviations remained. It is concluded that the proposed integration is functional and provides a platform for future research in metal additive manufacturing. However, its operation still depends on specialized knowledge and on improvements in cell calibration, especially in the relative positioning of the robots, whose maximum residual error was ± 13.973 mm, as well as in path planning and tool configuration.

Keywords: WAAM; industrial robotics; postprocessor; cooperative robotic system; GMAW.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagramas do Processo WAAM por GMAW	17
Figura 2 – Diagrama do Processo WLAM	18
Figura 3 – Parâmetros geométricos de cordões de solda	19
Figura 4 – Técnicas aplicadas durante o processo WAAM	25
Figura 5 – Impulsor fabricado por WAAM	26
Figura 6 – Diagrama de desenvolvimento do sistema	28
Figura 7 – Interface gráfica para coordenação de movimentos	30
Figura 8 – Modelos CAD do robô LH1500-C-6	31
Figura 9 – Atribuição de distâncias entre juntas no <i>Machine Maker</i>	32
Figura 10 – Disposição dos robôs na célula virtual	34
Figura 11 – Ferramentas dos robôs	35
Figura 12 – Parâmetros das operações aditivas	36
Figura 13 – Interface gráfica do <i>Postprocessor Generator</i>	37
Figura 14 – Interface do Visual Studio Code para desenvolvimento	37
Figura 15 – Programa para robô <i>FANUC</i>	38
Figura 16 – Programa para robô <i>LBBBD</i>	39
Figura 17 – Programa <i>ProgramView</i>	41
Figura 18 – Estrutura simplificada dos arquivos <i>.raw</i>	41
Figura 19 – Comportamento da função de tecimento em diferentes controladores	42
Figura 20 – Cordão com parâmetros ajustados	44
Figura 21 – Estratégia de deposição de camadas	45
Figura 22 – Trajetória calculada pelo <i>ENCY</i>	46
Figura 23 – Estratégia de deposição de camadas circulares	46
Figura 24 – Estratégia de deposição de paredes finas	47
Figura 25 – Posicionamento de início de deposição	47
Figura 26 – Posicionamento dos sistemas de coordenadas das juntas	49
Figura 27 – Atualização das distâncias entre juntas no <i>Machine Maker</i>	51
Figura 28 – Comparação entre posicionamento previsto e real	53
Figura 29 – Estrutura das configurações de trabalho	55
Figura 30 – Sequência de movimentos entre operações	56
Figura 31 – Fluxo de pós-processamento	57
Figura 32 – Desenvolvimento de sistema de resfriamento por ar comprimido . .	58
Figura 33 – Montagem do sistema de resfriamento	59
Figura 34 – Paralelepípedo produzido por WAAM	60
Figura 35 – Primeira hélice produzida por WAAM	61
Figura 36 – Defeitos superficiais na primeira peça	63
Figura 37 – Atualização do modelo CAD da peça helicoidal	64

Figura 38 – Cordão de solda com parâmetros modificados	64
Figura 39 – Segunda hélice produzida por WAAM	65
Figura 40 – Vista de topo das duas hélices produzidas	66
Figura 41 – Discrepância do posicionamento das hélices	67
Figura 42 – Medições de geometria de cordões de solda	73
Figura 43 – Configuração de soldagem no controlador <i>Betrun 1/2</i>	74
Figura 44 – Configuração de soldagem no controlador <i>Betrun 2/2</i>	74
Figura 45 – Pontos de teste do robô soldador	76
Figura 46 – Pontos de teste do robô manipulador	77
Figura 47 – Primeira verificação para robô soldador	78
Figura 48 – Segunda verificação para robô soldador	78
Figura 49 – Verificação para robô manipulador	79
Figura 50 – Registros das medições das peças helicoidais	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Cronograma de desenvolvimento do trabalho	28
Tabela 2 – Discrepância dos limites de juntas	33
Tabela 3 – Parâmetros de D-H	33
Tabela 4 – Exemplo de tradução de comandos	39
Tabela 5 – Estrutura de arquivos do controlador <i>Betrun</i>	39
Tabela 6 – Parâmetros de soldagem	43
Tabela 7 – Discrepância na posição de <i>Home</i> , em milímetros	48
Tabela 8 – Verificação de modelo cinemático	49
Tabela 9 – Verificação de modelo cinemático atualizado	50
Tabela 10 – Discrepância na posição de <i>Home</i> entre os robôs, em milímetros . .	51
Tabela 11 – Comprimentos ajustados dos manipuladores	52
Tabela 12 – Comparativo entre transformações	53
Tabela 13 – Medidas do bloco fabricado	60
Tabela 14 – Medidas da primeira peça helicoidal fabricada	62
Tabela 15 – Medidas da segunda peça helicoidal fabricada	66
Tabela 16 – Comandos do controlador <i>Betrun</i> nos arquivos .raw	75

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABS	<i>Acrilonitrila Butadieno Estireno</i>
API	<i>Application Programming Interface</i>
CAD	<i>Computer-aided Design</i>
CAM	<i>Computer-aided Manufacturing</i>
CLData	<i>Cutter Location Data</i>
CLS	<i>Cutter Location Source</i>
CNC	<i>Comando Numérico Computadorizado</i>
GMAW	<i>Gas Metal Arc Welding</i>
IFSC	<i>Instituto Federal de Santa Catarina</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
L-DED	<i>Laser Direct Energy Deposition</i>
MA	<i>Manufatura Aditiva</i>
TCP	<i>Tool Center Point</i>
WAAM	<i>Wire and Arc Additive Manufacturing</i>
WLAM	<i>Wire and Laser Additive Manufacturing</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Justificativa	14
1.2	Definição do Problema	15
1.3	Objetivo Geral	15
1.4	Objetivos Específicos	16
1.5	Estrutura do Trabalho	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1	Manufatura Aditiva Metálica com arame	17
2.1.1	GMAW	17
2.1.2	L-DED	18
2.1.3	Geometria de cordões para Manufatura Aditiva	19
2.2	CAM para Manufatura Aditiva	20
2.2.1	Estado atual	21
2.2.2	Perspectivas futuras	21
2.2.3	Pós-processador em sistemas CAM robóticos	22
2.3	Robótica Industrial	23
2.4	Estado da Arte	24
3	METODOLOGIA E DESENVOLVIMENTO	27
3.1	Abordagem de desenvolvimento	27
3.2	Equipamento da célula robotizada	29
4	DESENVOLVIMENTO	31
4.1	Configuração do <i>software</i> <i>ENCY</i>	31
4.1.1	Criação do esquema de máquina	31
4.1.2	Configuração das operações de trabalho	35
4.2	Desenvolvimento do pós-processador para robôs LBBBD	36
4.3	Desenvolvimento do compilador para os programas	39
4.4	Definição dos parâmetros de soldagem	42
4.4.1	Estratégia de deposição	44
4.5	Ensaio de correspondência entre as células virtual e real	47
4.5.1	Correções de posicionamento	47
4.5.2	Correções de cinemática	48
4.5.3	Correção de disposição da célula	52
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	55
5.1	Ambiente digital	55
5.2	Simulação de fabricação de peças	55
5.3	Conjunto pós-processador e compilador	56
5.4	Fabricação de peças	58
5.4.1	Sistema de resfriamento	58
5.4.2	Fabricação de geometria conhecida	60
5.4.3	Fabricação de geometria com reorientação do substrato	61
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	68
6.1	Limitações	68
6.2	Sugestões para trabalhos futuros	68
	REFERÊNCIAS	70

APÊNDICES	72
APÊNDICE A – CORDÕES DE SOLDA	73
APÊNDICE B – COMANDOS DO CONTROLADOR <i>BETRUN</i> EM ARQUIVOS .RAW	75
APÊNDICE C – PONTOS EXPORTADOS PARA TESTES	76
APÊNDICE D – REGISTROS DAS MEDIÇÕES DIMENSIONAIS . .	80

1 INTRODUÇÃO

A Manufatura Aditiva (MA) tem recebido crescente atenção da indústria, impulsionada pelo paradigma da Indústria 4.0 e pela demanda por processos mais ágeis e capazes de lidar com geometrias complexas. Após a consolidação na prototipagem, a tecnologia evoluiu para a fabricação de componentes metálicos em setores estratégicos, como o aeroespacial e o automotivo (VALENTIN; ARNAUD; KLING, 2019).

Entre os processos de MA metálica com arame, o *Wire and Arc Additive Manufacturing* (WAAM) se destaca por sua alta taxa de deposição e eficiência de material, próxima de 100%, para a fabricação de peças de grande porte (DING et al., 2015). No entanto, o alto aporte de energia térmica do WAAM impõe desafios críticos, como tensões residuais e distorções geométricas, que limitam sua precisão dimensional e exigem estratégias rigorosas de resfriamento e controle (TEICHMANN et al., 2026).

Nesse contexto, o uso de *softwares* de *Computer-Aided Manufacturing* (CAM) dedicados à manufatura aditiva multieixos surge como solução para o planejamento de trajetórias, otimização de estratégias de deposição e prevenção de colisões em sistemas robóticos (CAMPOCASSO et al., 2018). A integração de braços robóticos industriais amplia ainda mais esse potencial. Um manipulador pode ser responsável pela deposição do material, enquanto outro manipula a peça, permitindo impressão multieixos sem suportes (HEDRICK; URBANIC; BURFORD, 2015).

Apesar do avanço do CAM para MA, a adoção industrial da robótica de menor custo é limitada pela carência de ferramentas digitais adequadas. Especificamente, a geração de pós-processadores para robôs de fabricantes menos consolidados, essenciais para traduzir as trajetórias simuladas via CAM em código executável para o robô físico, geralmente não está disponível nativamente em *softwares* comerciais (HEDRICK; URBANIC; BURFORD, 2015). Este trabalho aborda essa lacuna, utilizando o *software* *ENCY* (ex-*SprutCAM*), escolhido por oferecer recursos de simulação para manufatura aditiva multieixos e suporte à criação de pós-processadores customizados.

1.1 Justificativa

Este trabalho se justifica pela necessidade de tornar as soluções de manufatura aditiva metálica por arame (WAAM) mais flexíveis e acessíveis à indústria. A lacuna tecnológica reside na integração eficiente entre o planejamento CAM multieixos e a execução robótica utilizando equipamentos de menor custo.

Ao contrário de controladores de fabricantes consolidados, como *ABB* ou *FANUC*, amplamente suportados pelos *softwares* CAM comerciais, o controlador *Be-*

trun não possui pós-processador comercial disponível. Ademais, esse controlador utiliza arquivos proprietários em formato binário, adicionando mais uma barreira para a integração com CAM.

Ao desenvolver um fluxo digital completo envolvendo modelagem da célula, geração automática de trajetórias, pós-processamento customizado e compilação para controladores *Betrun*, e ao demonstrar a metodologia de planejamento no *software ENCY*, este estudo viabiliza a implementação de soluções WAAM avançadas com robôs industriais de menor investimento, contribuindo para a democratização do acesso a essa tecnologia.

Ademais, o presente projeto aproveita o trabalho prévio de integração da célula robotizada, conduzido como Projeto Integrador no semestre anterior à realização do presente trabalho (KUNER et al., 2025). Dessa forma, além de dar continuidade a um trabalho prévio, contribui-se para a consolidação da MA metálica no Brasil, alinhando a pesquisa nacional aos conceitos de gêmeo digital (*digital twin*) e Indústria 4.0 por meio da integração de simulação CAM, pós-processamento customizado e automação robótica.

1.2 Definição do Problema

A manufatura aditiva por deposição de arame integrada a sistemas robóticos representa uma alternativa promissora para a fabricação de componentes metálicos complexos e de grande porte. No entanto, a implementação prática enfrenta barreiras técnicas relacionadas ao planejamento de trajetórias, à prevenção de colisões e à precisão geométrica da peça.

Embora *softwares* CAM avancem no suporte a processos aditivos multieixos, a utilização de robôs de menor custo ou de fabricantes pouco consolidados ainda apresenta limitações significativas, principalmente pela ausência de pós-processadores dedicados. Essa lacuna impede que as trajetórias simuladas sejam efetivamente traduzidas em programas executáveis pelo robô.

Neste contexto, surge o problema central: como integrar o *software ENCY* ao processo WAAM, desenvolvendo um pós-processador específico para os robôs disponíveis, de modo a possibilitar a coordenação entre dois manipuladores industriais (um para deposição e outro para manipulação da peça) e garantir a viabilidade de fabricação?

1.3 Objetivo Geral

Investigar e validar a utilização do *software ENCY* como ferramenta para simulação e execução do processo de manufatura aditiva metálica por arco elétrico

(WAAM), empregando um sistema robótico composto por dois manipuladores industriais.

1.4 Objetivos Específicos

Para alcançar o objetivo supracitado, pode-se dividi-lo nas seguintes etapas:

- a) Realizar revisão bibliográfica sobre o processo WAAM, *softwares* CAM e aplicações robóticas em manufatura aditiva;
- b) Selecionar e configurar o *software* *ENCY* para simulação do processo de manufatura aditiva;
- c) Desenvolver e validar um pós-processador específico para o robô disponível, de forma a permitir a geração de trajetórias executáveis a partir da simulação CAM;
- d) Desenvolver estratégias de deposição considerando a cooperação entre dois robôs (um para deposição, outro para manipulação da peça);
- e) Simular digitalmente a fabricação de uma peça teste, analisando trajetória, acessibilidade, prevenção de colisões e restrições geométricas;
- f) Fabricar a peça teste, utilizando a rotina previamente simulada;
- g) Comparar os resultados da simulação e da fabricação, identificando limitações e oportunidades de melhoria.

1.5 Estrutura do Trabalho

A estrutura deste trabalho está organizada em seis capítulos principais. No primeiro, apresenta-se a introdução, com a contextualização do tema, a justificativa, o problema de pesquisa e os objetivos. O segundo capítulo é dedicado à fundamentação teórica, contemplando os conceitos de manufatura aditiva metálica com arame, simulação CAM, robótica industrial e estado da arte do processo WAAM. Em seguida, o terceiro capítulo descreve a metodologia adotada, detalhando o *software* utilizado e a estrutura da célula robotizada disponível. O quarto capítulo detalha o desenvolvimento do ambiente digital, do pós-processador customizado e dos ensaios de fabricação. A apresentação e a discussão dos resultados obtidos são realizadas no quinto capítulo. Por fim, o sexto capítulo reúne as considerações finais, destacando as conclusões do estudo e apontando perspectivas para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são apresentados os conceitos necessários ao desenvolvimento do trabalho: manufatura aditiva metálica com arame e arco elétrico (WAAM), simulação CAM, pós-processamento e robótica industrial.

2.1 Manufatura Aditiva Metálica com arame

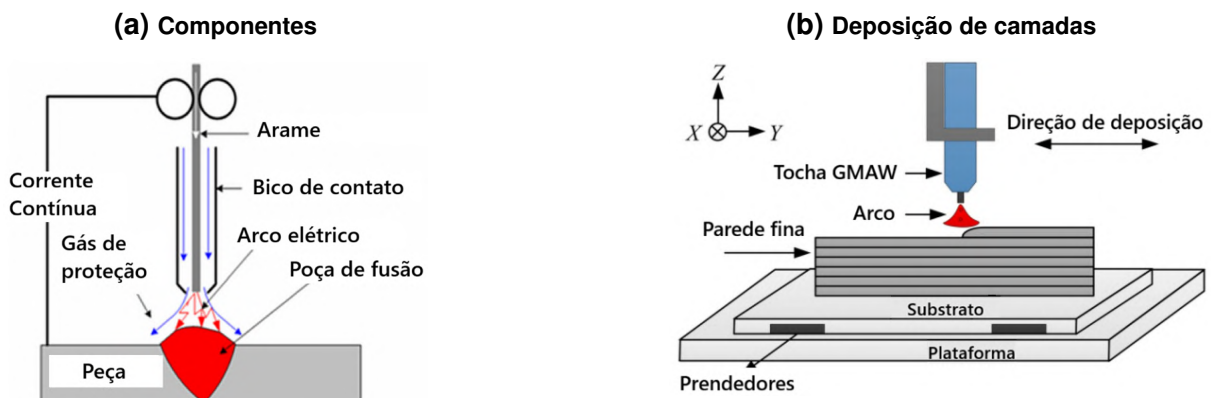
Entre os processos de manufatura aditiva metálica, destacam-se aqueles que utilizam material de adição na forma de arame ou pó. O processo de manufatura aditiva por arame e arco elétrico (*Wire Arc Additive Manufacturing, WAAM*) apresenta elevada taxa de deposição e alta eficiência de material, pois o arame alimentado tende a ser incorporado diretamente ao componente. Segundo Lambiase et al. (2025), o WAAM pode proporcionar taxas de deposição superiores a $10 \text{ cm}^3/\text{min}$, tipicamente operando a 4 kg/h , enquanto processos de leito de pó, como a fusão em leito de pó a laser (*Laser Powder Bed Fusion, LPBF*), apresentam taxas tipicamente inferiores a $0,2 \text{ cm}^3/\text{min}$.

Nas tecnologias baseadas em arame, a fonte de energia influencia a forma da poça de fusão, o controle térmico e a precisão geométrica do componente. Em seguida, são descritas as características dos processos de deposição mais relevantes para este trabalho.

2.1.1 GMAW

O processo *Gas Metal Arc Welding* (GMAW) é amplamente empregado na manufatura aditiva por arco e arame (WAAM). Os diagramas das Figuras 1a e 1b ilustram melhor esse processo.

Figura 1 – Diagramas do Processo WAAM por GMAW



Fonte: Adaptado de (DING et al., 2015)

Fonte: Adaptado de (XIONG et al., 2018)

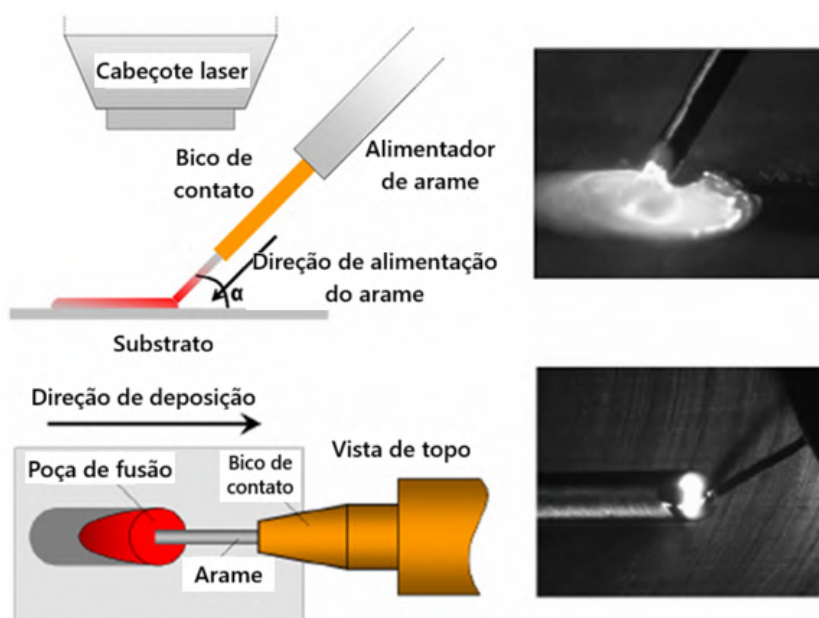
Sua elevada taxa de deposição é acompanhada por maior aporte térmico, o que pode intensificar distorções, tensões residuais e desvios dimensionais. Por isso, o controle da temperatura interpasse, o resfriamento ativo do substrato, a refrigeração localizada e as estratégias híbridas com usinagem intermediária são empregados para limitar o acúmulo de calor e melhorar a estabilidade geométrica do processo (VERLINDE et al., 2021).

Essas abordagens são coerentes com o estudo de Teichmann et al. (2026), que comparou diferentes estratégias de resfriamento na manufatura aditiva de aço carbono por WAAM-GMAW. Entre os métodos avaliados, o resfriamento por ar comprimido reduziu o tempo de espera entre camadas, em comparação à fabricação sem resfriamento, diminuiu deformações geométricas e auxiliou na remoção de silicatos da superfície fundida.

2.1.2 L-DED

Por outro lado, a combinação de laser pelo processo *Laser Direct Energy Deposition* (L-DED) com arame, conhecida como *Wire and Laser Additive Manufacturing* (WLAM), surge como um processo intermediário que oferece um bom equilíbrio entre produtividade e precisão (DING et al., 2015). A Figura 2 a seguir ilustra esse método.

Figura 2 – Diagrama do Processo WLAM



Fonte: (DING et al., 2015)

Ao usar laser no processo de adição com arame, como no WLAM, é possível manter uma boa precisão geométrica e reduzir a distorção, o que é particularmente

relevante para aplicações que demandam componentes de alta performance, como na indústria aeroespacial (DING et al., 2015).

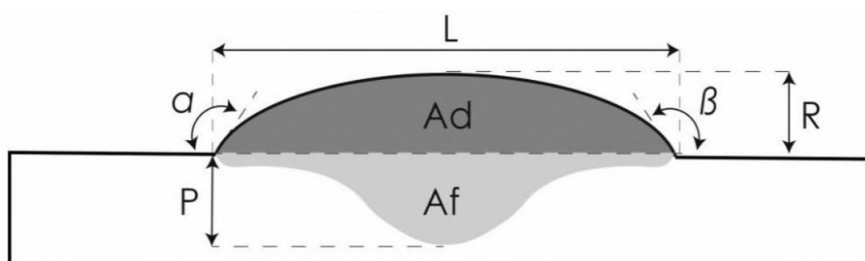
Entretanto, deve-se ressaltar a complexidade adicional envolvida no planejamento de trajetórias para o processo WLAM, fator crucial para a programação CAM. Primeiramente, a natureza óptica do feixe laser significa que a utilização da ferramenta em qualquer configuração diferente da normal à superfície acarreta uma mudança no tamanho e na intensidade do feixe, o que exige controle complexo do eixo para manter a perpendicularidade ou um ajuste dinâmico de parâmetros (GONZÁLEZ et al., 2017). Ademais, Verlinde et al. (2021) ressaltam que a característica de alimentação externa e não coaxial de material de adição, muito usual em equipamentos convencionais, impõe limitações significativas, como detalhado abaixo:

"Esses processos, no entanto, dependem de alimentação externa de arame; para garantir a consistência da deposição, o arame deve ser sempre alimentado na mesma direção, o que requer a rotação da tocha, complicando, assim, a programação CAM do robô. [...] Diversos pesquisadores relataram que a direção de alimentação do arame (isto é, frontal, traseira ou lateral) e os ângulos têm impacto significativo na qualidade do cordão depositado. A necessidade de uma rotação adicional in-situ do bico de alimentação aumenta a complexidade do sistema e dificulta a sua integração com máquinas CNC." (VERLINDE et al., 2021, p. 11, *tradução nossa*).

2.1.3 Geometria de cordões para Manufatura Aditiva

A geometria do cordão de solda é o bloco de construção fundamental no processo WAAM, determinando a altura da camada, a espessura do componente e a qualidade geral da peça depositada. A seção transversal de um cordão é caracterizada por parâmetros como a largura (w ou L), a altura de reforço (h ou R) e a área depositada (A_d), que representa o material adicionado acima do substrato (VERLINDE et al., 2021). A Figura 3 ilustra esses parâmetros.

Figura 3 – Parâmetros geométricos de cordões de solda



Fonte: (TEICHMANN et al., 2026)

Uma métrica crítica para caracterizar a morfologia do cordão é a relação R/L (ou h/w), que representa a razão entre a altura de reforço e a largura do cordão

(VERLINDE et al., 2021). De acordo com Teichmann et al. (2026), essa relação fornece informações sobre o modo de deposição e a distribuição de calor; cordões de preenchimento criados com movimentos de tecimento (*weaving*) distribuem o calor de forma mais ampla, resultando em uma poça de fusão mais larga, maior diluição e uma relação R/L tipicamente menor em comparação com cordões de contorno.

Adicionalmente, é importante fundamentar como os parâmetros do processo GMAW afetam a geometria do cordão. Segundo (VERLINDE et al., 2021), ela é altamente sensível às variáveis de velocidade de alimentação do arame (V_a) e de velocidade de deslocamento (V_d). O aumento da V_a incrementa tanto a altura quanto a largura do cordão, enquanto o aumento da V_d leva a uma diminuição em ambas as dimensões.

Além disso, o acúmulo de temperatura durante o processo altera significativamente a forma do cordão. À medida que a peça cresce em altura, a dissipação de calor por condução torna-se menos eficiente, aumentando a fluidez da poça de fusão e causando o "espalhamento do cordão", em que as camadas subsequentes tendem a ser mais baixas e largas do que os cordões iniciais depositados sobre um substrato frio (VERLINDE et al., 2021).

2.2 CAM para Manufatura Aditiva

O CAM atua como interface entre o modelo digital e a produção física, permitindo planejar e controlar processos de fabricação. Em manufatura aditiva, esse fluxo geralmente parte de modelos CAD, passa por etapas de fatiamento (*slicing*) e resulta no planejamento das trajetórias de ferramenta (CAMPOCASSO et al., 2018).

O objetivo central de um sistema CAM é converter dados de projeto em comandos operacionais para máquinas de Controle Numérico Computadorizado (CNC) ou robôs industriais (LATIF et al., 2021). Essa conversão depende de um pós-processador, responsável por traduzir as trajetórias calculadas para a linguagem de uma máquina ou controlador específico (CAMPOCASSO et al., 2018).

Em máquinas CNC, essa linguagem é frequentemente baseada em código G, formalizado pela norma ISO 6983 (LATIF et al., 2021). Entretanto, aplicações industriais específicas podem exigir pós-processadores customizados, principalmente quando a máquina, o controlador ou o processo demandam comandos não contemplados por configurações genéricas (CHAN; KWAN, 2003).

A adoção de *softwares* CAM voltados à manufatura aditiva ainda se encontra em consolidação. No caso do WAAM, o interesse por peças de grande porte, elevada produtividade e fabricação multieixos aumenta a demanda por ferramentas capazes de integrar planejamento geométrico, simulação de célula e pós-processamento.

2.2.1 Estado atual

As ferramentas CAM aplicadas ao WAAM ainda se encontram em um estágio menos consolidado que os sistemas voltados à manufatura subtrativa. Segundo Verlinde et al. (2021), as soluções disponíveis podem ser agrupadas em dois tipos principais: extensões baseadas em plataformas CNC/CAM, como *SprutCAM Robot* (atualmente *ENCY*), *PowerMill*, *Robotmaster*, *Hypermill*, *Siemens NX* e *Eureka*; e *softwares* específicos para WAAM, como *Metal XL*, *Factory OS*, *WAAMMat* e *WAAM3D*.

As soluções baseadas em CAM CNC apresentam como vantagem a possibilidade de planejar operações de deposição e usinagem em uma mesma plataforma. Contudo, sua funcionalidade para WAAM pode ser limitada, especialmente quanto à variedade de estratégias de deposição, ao controle dos parâmetros de soldagem e à interface, que tende a empregar terminologia voltada à usinagem. Já os *softwares* específicos para WAAM oferecem recursos mais direcionados ao processo, como tratamento de temperatura interpasse, corrente, tensão e aquisição de dados associada à posição na peça. Em contrapartida, podem apresentar menor compatibilidade com diferentes marcas de robôs e controladores (VERLINDE et al., 2021).

Além da geração de trajetórias, o pós-processamento permanece como etapa crítica. A tradução dos movimentos tende a ser mais direta do que a tradução dos comandos de soldagem, pois estes dependem da fonte de energia, do controlador e da forma de parametrização adotada. Assim, a depuração do pós-processador torna-se mais complexa quando envolve acionamento de arco, parâmetros de soldagem e integração com a fonte (VERLINDE et al., 2021).

Dessa forma, ainda existe uma lacuna prática entre a simulação da trajetória e sua execução confiável em células robotizadas específicas. Essa lacuna é particularmente relevante quando se utilizam robôs ou controladores com menor suporte nativo em *softwares* comerciais.

2.2.2 Perspectivas futuras

A evolução dos sistemas CAM para manufatura aditiva tende à integração entre planejamento geométrico, simulação de máquina e informações físicas do processo. Em aplicações multieixos, essa integração é necessária para selecionar estratégias de deposição compatíveis com diferentes regiões da peça, orientar ferramenta e componente, manter a acessibilidade da tocha e reduzir riscos de colisão (CAMPO-CASSO et al., 2018).

Nesse sentido, González et al. (2017) apresentam uma interface de programação para aplicação (*Application Programming Interface*, API) de manufatura aditiva integrada ao *software Siemens NX*, com recursos voltados ao processo L-DED. A solução descrita permite definir a ferramenta de deposição, planejar trajetórias em três

e cinco eixos, simular a máquina e gerar cordões a partir de parâmetros do processo. Embora aplicada ao L-DED, essa abordagem evidencia a incorporação gradual de funções específicas de manufatura aditiva em plataformas CAM industriais.

Para processos como WAAM, essa evolução também envolve aquisição de dados, compensação geométrica e calibração de parâmetros. Verlinde et al. (2021) indicam que sistemas específicos para WAAM podem associar temperatura interpasse, corrente e tensão à posição na peça, além de empregar escaneamento intermediário e comparação com o modelo tridimensional. Assim, a tendência é que o CAM deixe de atuar apenas como gerador de trajetórias e passe a operar como ambiente de planejamento, simulação e correção do processo.

2.2.3 Pós-processador em sistemas CAM robóticos

O pós-processador é o componente responsável por traduzir as trajetórias calculadas pelo CAM para a linguagem exigida por uma máquina ou controlador específico. Em sistemas robóticos, essa etapa converte os dados de localização da ferramenta, ou *Cutter Location Source data* (CLS ou CLData), em comandos compatíveis com o fabricante do robô (NAGATA et al., 2017).

Segundo Nagata et al. (2017), os dados CLS descrevem movimentos lineares por meio de comandos do tipo *GOTO* e movimentos circulares por meio de comandos do tipo *CIRCLE*. O pós-processador interpreta essas informações de posição e orientação e as converte para o formato de programa do robô, como arquivos .LS em controladores *FANUC*.

No caso de WAAM, o pós-processamento também envolve a integração dos comandos de soldagem. Verlinde et al. (2021) observam que os comandos de movimento normalmente são suportados por diversos sistemas CAM, enquanto os comandos de soldagem dependem mais diretamente da fonte de energia, do controlador e da parametrização adotada. Alguns controladores também possuem limite máximo de pontos ou linhas de programa, o que pode se tornar uma restrição em trajetórias longas de manufatura aditiva.

Para os comandos de soldagem, Verlinde et al. (2021) apontam a possibilidade de reproduzir os comandos do *teach pendant* ou empregar comandos simplificados. A primeira abordagem facilita ajustes durante os testes, mas aumenta a complexidade do programa. A segunda reduz a complexidade após a definição dos parâmetros, mas limita alterações diretas no controlador. Dessa forma, o pós-processador assume papel central na passagem entre a simulação CAM e a execução física do processo WAAM em uma célula robotizada.

2.3 Robótica Industrial

Robôs industriais são equipamentos multifuncionais, programáveis e destinados ao deslocamento de materiais, componentes, ferramentas ou dispositivos especiais por meio de movimentos programados. Em aplicações industriais, esses sistemas são empregados em tarefas como manipulação de materiais e soldagem, sendo adequados a processos que exigem repetibilidade, controle de trajetória e integração com outros equipamentos de fabricação (SANTOS, 2004).

No contexto deste trabalho, a expressão robôs de baixo custo não designa uma categoria normativa, mas uma condição relativa de aquisição e integração. Tratam-se de equipamentos industriais cujo investimento inicial é substancialmente inferior ao de células comerciais integradas de soldagem e que, em contrapartida, tendem a apresentar menor disponibilidade de pós-processadores prontos, documentação de integração e suporte nativo em plataformas CAM.

Essa diferença pode ser observada nos equipamentos disponíveis ao Laboratório de Automação da Soldagem do IFSC. O sistema *Panasonic TL 1800 S AWP*, caracterizado por Verlinde et al. (2021) como um sistema fechado de soldagem, integrado de forma inseparável à fonte de soldagem, custou US\$ 49.500,00. Em comparação, cada conjunto utilizado neste trabalho, composto por robô *LBBBD* e respectiva fonte de soldagem *OTC*, custou US\$ 7.970,00. Assim, cada conjunto *LBBBD/OTC* corresponde a aproximadamente 16,1% do valor do sistema *Panasonic*, ou cerca de 6,2 vezes menos. Essa diferença contextualiza a escolha por uma solução de menor investimento e reforça a relevância de desenvolver recursos próprios de simulação, pós-processamento e compilação para o controlador disponível.

Um braço robótico industrial é composto por elos, juntas, atuadores, sensores, controlador e efetuator final, ou *end-effector*. Os elos formam a estrutura mecânica do braço, enquanto as juntas permitem o movimento relativo entre eles. As juntas podem ser prismáticas, quando produzem deslocamento linear, ou rotacionais, quando produzem movimento angular. Em braços robóticos industriais, é comum distinguir as juntas principais, associadas ao posicionamento do efetuator no espaço, das juntas do punho, associadas principalmente à sua orientação (SANTOS, 2004).

Para que um braço robótico seja representado em um ambiente CAM, é necessário descrever matematicamente sua cinemática. A cinemática direta relaciona as variáveis das juntas com a posição e orientação do efetuator final no espaço operacional, enquanto a cinemática inversa determina as variáveis de junta necessárias para atingir uma postura desejada. Essa relação é essencial para transformar trajetórias planejadas no espaço cartesiano da peça em comandos executáveis pelas juntas do robô (SANTOS, 2004).

Uma forma usual de modelar a cinemática direta de manipuladores seri-ais é a representação de Denavit e Hartenberg. Nesse método, a relação entre elos consecutivos é descrita pelos parâmetros θ_i , d_i , L_i e α_i , que representam, respectivamente, o ângulo da junta, o deslocamento do elo, o comprimento do elo e o ângulo de torção. A matriz de transformação homogênea entre dois elos consecutivos é dada pela Equação 1 (SANTOS, 2004).

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & -\sin(\theta_i)\cos(\alpha_i) & \sin(\theta_i)\sin(\alpha_i) & L_i\cos(\theta_i) \\ \sin(\theta_i) & \cos(\theta_i)\cos(\alpha_i) & -\cos(\theta_i)\sin(\alpha_i) & L_i\sin(\theta_i) \\ 0 & \sin(\alpha_i) & \cos(\alpha_i) & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Em manipuladores com múltiplas juntas, a postura final do efetuador em relação à base é obtida pela multiplicação sequencial das matrizes de transformação de cada elo, conforme a Equação 2.

$${}^0T_n = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 \dots {}^{n-1}T_n \quad (2)$$

Dessa forma, a simulação de uma célula robotizada em ambiente CAM depende da correta definição dos sistemas de coordenadas, dos parâmetros cinemáticos e dos limites de movimento do braço robótico. Essas informações permitem verificar a acessibilidade da ferramenta, calcular trajetórias compatíveis com a estrutura do robô e reduzir riscos de colisão durante a execução do processo.

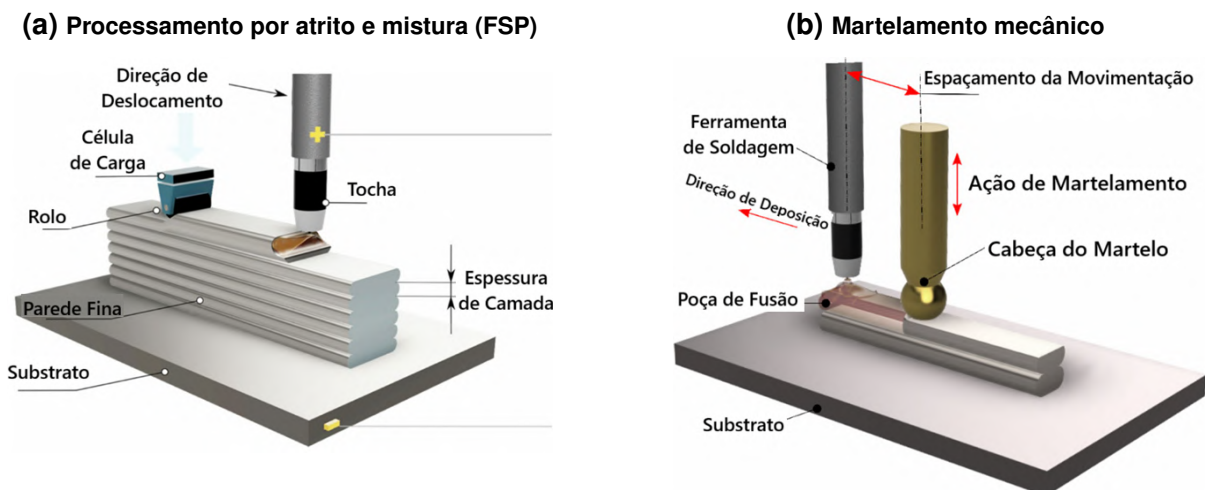
2.4 Estado da Arte

O estado da arte em WAAM indica que a maturidade industrial do processo depende não apenas da taxa de deposição, mas também da capacidade de controlar efeitos térmicos, distorções, tensões residuais, geometria dos cordões e repetibilidade da fabricação. Segundo Lambiase et al. (2026), os avanços recentes em WAAM concentram-se em melhorias de processo, monitoramento, simulação numérica, tratamentos posteriores e aplicações industriais, com o objetivo de aumentar a confiabilidade de componentes metálicos de grande porte.

Entre as soluções de melhoria de processo, destacam-se técnicas aplicadas durante a fabricação, ou em condição local durante o processo (*in situ*). O processamento por atrito e mistura (*friction stir processing*, FSP) é empregado para refinar a microestrutura, reduzir porosidade e melhorar propriedades mecânicas, conforme representado na Figura 4a. A rolagem entre camadas e o martelamento mecânico

(*hammer peening*) introduzem deformação plástica controlada sobre o material depositado, contribuindo para a redução de tensões residuais, distorções e irregularidades superficiais, conforme representado na Figura 4b.

Figura 4 – Técnicas aplicadas durante o processo WAAM



Fonte: Adaptado de (LAMBIASE et al., 2026)

Fonte: Adaptado de (LAMBIASE et al., 2026)

A simulação numérica constitui outro eixo importante do desenvolvimento do WAAM. Modelos térmicos permitem estimar campos de temperatura, gradientes térmicos, taxas de resfriamento e acúmulo de calor ao longo das camadas. Já as análises mecânicas são empregadas para prever tensões residuais, distorções e efeitos da direção de deposição. Essas ferramentas reduzem a necessidade de ensaios experimentais extensos e auxiliam na escolha de parâmetros, estratégias de preenchimento e sequências de deposição. No planejamento CAM, esses dados fornecem subsídios para avaliar trajetórias, acessibilidade, controle térmico e qualidade geométrica antes da execução física do processo (LAMBIASE et al., 2026).

As aplicações industriais descritas na literatura mostram a adoção do WAAM em setores como aeroespacial, automotivo, naval, construção e energia. Na indústria aeroespacial, o processo é explorado para estruturas de grande porte fabricadas com ligas de alto valor, com potencial de redução de desperdício e prazos de fabricação. No setor naval, destacam-se componentes como hélices e peças de reposição de grande dimensão. Na construção, são citadas estruturas metálicas e conectores fabricados por deposição robotizada. No setor de energia, o processo é aplicado a componentes de grande porte e geometrias complexas, nos quais a fabricação convencional pode exigir longos prazos e elevado consumo de material (LAMBIASE et al., 2026).

Um exemplo representativo é o caso da MX3D com a Framatome, no qual foi avaliada a fabricação por WAAM de um impulsor em aço inoxidável 316L para

aplicação no setor nuclear, exibido nas Figuras 5a e 5b.

Figura 5 – Impulsor fabricado por WAAM

(a) Vista superior



Fonte: (MX3D, 2026a)

(b) Vista lateral



Fonte: (MX3D, 2026a)

O projeto incluiu desenvolvimento da estratégia de impressão, otimização e simulação de trajetórias, fabricação parcial para validação de parâmetros, controle de resfriamento, produção em escala real, tratamento térmico, acabamento por usinagem e verificação dimensional por escaneamento 3D. A peça exigiu ainda o uso de manipulador de alta carga para permitir rotação e acessibilidade durante a deposição. Esse caso evidencia a relevância da integração entre robótica, planejamento digital, controle de processo e rastreabilidade para aplicações industriais críticas (MX3D, 2026a).

Entre as soluções comerciais de células robotizadas integradas para WAAM, a MX3D disponibiliza os sistemas M1 e MX. O M1 consiste em uma solução pronta para uso (*turnkey*), com configuração robótica otimizada de oito eixos e destinada à impressão metálica robotizada em escala industrial. O MX, por sua vez, é uma plataforma customizável, equipada com alta capacidade de carga, projetada para fabricar componentes com mais de 6 m e cargas superiores a 20 t, inclusive com múltiplas peças e ligas.

Ambas as soluções utilizam o sistema computacional proprietário *MetaXL*, composto pelos módulos *CAM*, para planejamento de trajetórias, estratégias de deposição, verificação de viabilidade e fatiamento; *Live*, para simulação, controle em tempo real, monitoramento e registro de dados; e *Viz*, para análise tridimensional após a fabricação, detecção de defeitos, certificação das peças e refinamento das estratégias (MX3D, 2026b).

Portanto, o avanço do WAAM está associado à integração entre deposição, controle térmico, simulação, planejamento de trajetórias e automação robotizada. Nesse contexto, a utilização de um ambiente CAM capaz de simular a célula, gerar trajetórias e permitir pós-processamento customizado torna-se fundamental para aproximar a pesquisa experimental de uma aplicação industrial reproduzível.

3 METODOLOGIA E DESENVOLVIMENTO

Este capítulo apresenta a abordagem metodológica adotada para o desenvolvimento deste trabalho, descrevendo de forma geral as etapas desenvolvidas, os critérios de avaliação e os mecanismos de validação do sistema proposto. Em seguida, essas etapas são descritas em detalhe.

3.1 Abordagem de desenvolvimento

Considerando o caráter aplicado deste estudo, optou-se por uma metodologia centrada na verificação funcional das etapas do projeto. Ademais, optou-se por conduzir o desenvolvimento de forma incremental, isto é, iniciar cada etapa somente após a validação da etapa anterior, garantindo continuidade lógica, identificação de problemas e maior controle sobre a complexidade crescente do sistema.

Desse modo, o desenvolvimento foi conduzido e avaliado segundo os seguintes critérios:

- Configuração do *software* *ENCY*: criação de uma célula virtual contendo os robôs industriais utilizados, assegurando que o ambiente seja capaz de realizar cálculos cinemáticos adequados para a geração de trajetórias.
- Pós-processador específico para o robô: implementação de um pós-processador capaz de converter as trajetórias geradas no *software* CAM para uma linguagem compatível com a sintaxe de comandos do controlador do manipulador robótico.
- Compilador específico para o robô: desenvolvimento de um *script* capaz de traduzir as informações contidas no arquivo de texto gerado pelo pós-processador para o formato binário esperado pelo controlador do robô.
- Estratégias de deposição cooperativas: inserção e coordenação de múltiplos robôs em uma única célula, definindo operações cooperativas nas quais um manipulador atua como orientador da peça enquanto o outro realiza a deposição.
- Simulação do processo de fabricação: execução de uma simulação completa, livre de colisões e falhas de *software*, que demonstre a viabilidade da geometria proposta e a coerência das trajetórias planejadas.
- Execução no robô real: transferência do programa pós-processado para o controlador do robô industrial, seguida da reprodução das trajetórias simuladas.
- Fabricação experimental da peça: produção de um corpo de prova e comparação entre suas dimensões efetivas e o modelo geométrico previsto.

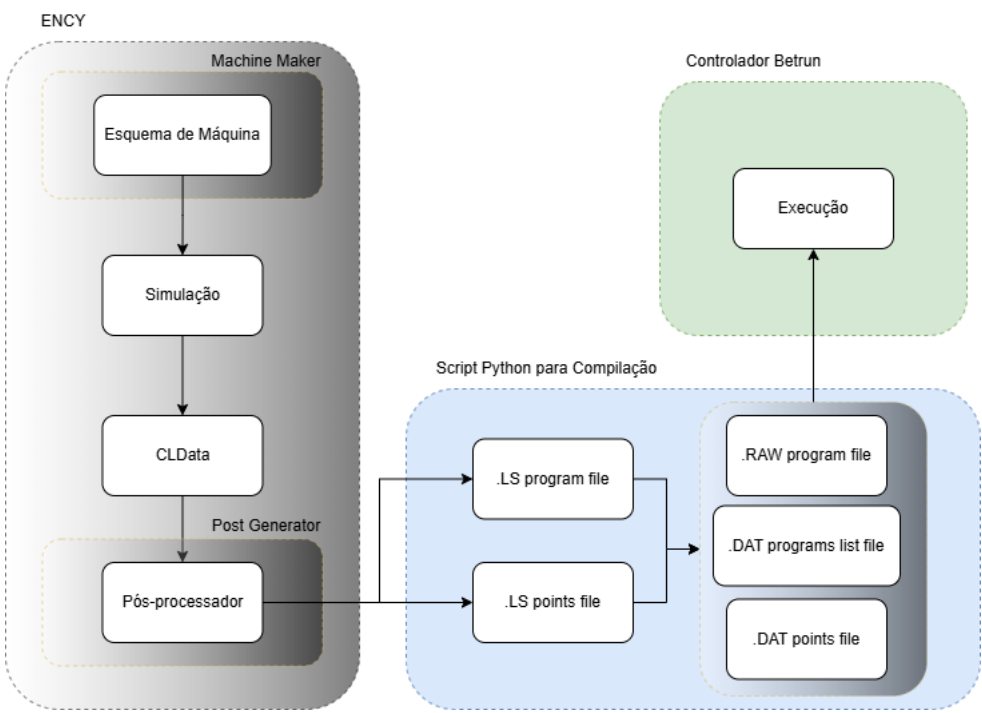
Para melhor organizar as etapas de desenvolvimento, também foi elaborado o cronograma apresentado na Tabela 1, o qual foi acompanhado pelo autor por meio da plataforma de gestão de projetos *Jira*, utilizando a metodologia ágil *Scrum*.

Tabela 1 – Cronograma de desenvolvimento do trabalho

Etapa	Período estipulado
Revisão bibliográfica	Outubro 2025 - Janeiro 2026
Configuração da célula física	Janeiro 2026 - Fevereiro 2026
Desenvolvimento do pós-processador e verificação	Janeiro 2026 - Fevereiro 2026
Desenvolvimento do compilador e verificação	Fevereiro 2026 - Março 2026
Configuração de célula virtual	Março 2026
Simulação de fabricação e refinamento de estratégia	Abril 2026 - Maio 2026
Fabricação de peças e medições	Maio 2026 - Junho 2026
Revisão dos resultados e finalização da escrita	Junho 2026

Com a finalidade de explicitar a relação entre cada etapa do desenvolvimento, elaborou-se o diagrama ilustrado pela Figura 6.

Figura 6 – Diagrama de desenvolvimento do sistema



Fonte: Elaboração própria (2026)

No diagrama é possível observar claramente a separação entre os ambientes usados para o desenvolvimento de cada atividade, assim como as ferramentas específicas utilizadas em cada etapa, por exemplo, *Machine Maker* e *Post Generator*.

3.2 Equipamento da célula robotizada

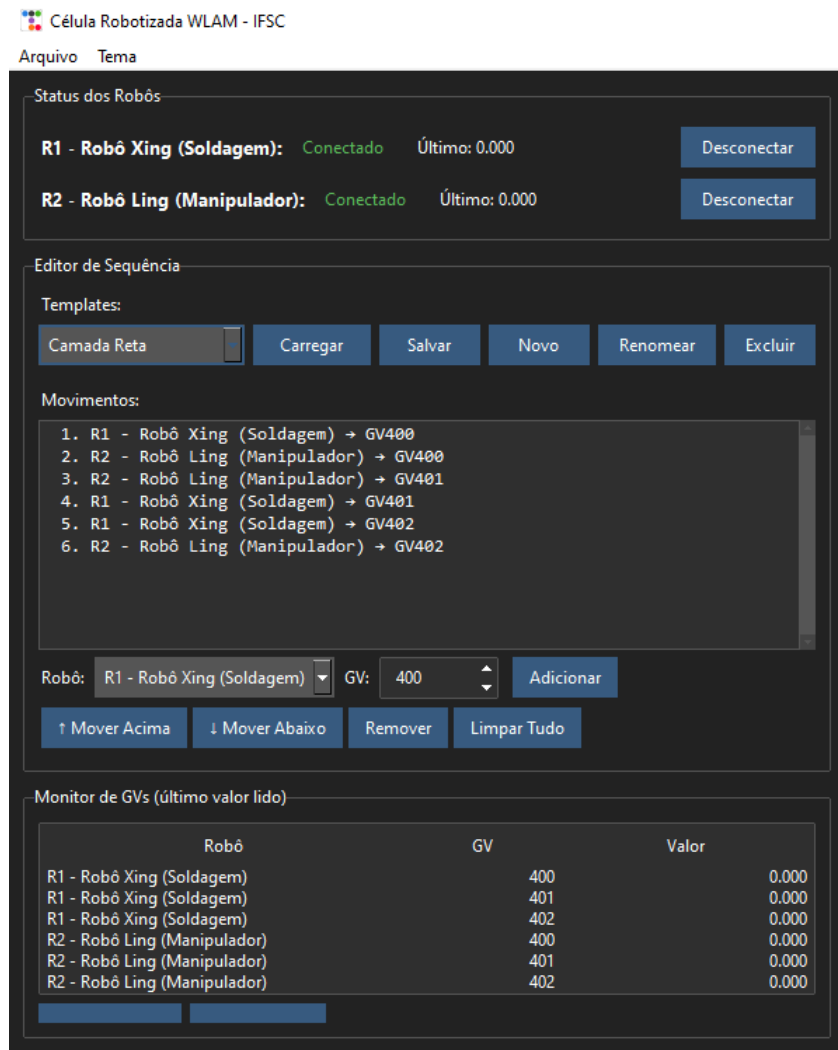
A célula utilizada no presente trabalho, conforme descrita e desenvolvida por Kuner et al. (2025), é constituída por:

- dois (2) braços robóticos antropomórficos de soldagem de baixo custo, modelo LH1500-C-6 da *LBBBD Global*, com alcance de trabalho de 1500 mm, capacidade de carga (*payload*) de 10 kg e repetibilidade de posicionamento de $\pm 0,03$ mm (LBBBD Robots, 2024);
- dois (2) controladores dos referidos braços robóticos, com software da *Betrun* vendido pela *LBBBD Global*;
- duas (2) fontes de soldagem por arco elétrico, modelo CPVE400 da OTC;
- duas (2) fontes de soldagem manual laser, de 2500 W e 3000 W da *MaxPhotonics*, vendidas pela *DMK Laser* (não utilizadas no presente trabalho);

As fontes de soldagem são integradas aos controladores dos braços robóticos. Além disso, os controladores são integrados entre si por meio do protocolo de comunicação *Modbus*, assumindo papel de clientes/escravos (*clients/slaves*) para um computador que atua como servidor/mestre (*server/master*). Essa integração possibilita a execução de rotinas de maneira parcialmente síncrona, por meio do acionamento intercalado de variáveis globais em cada controlador por parte do computador. Essa configuração foi adotada devido à incapacidade de um controlador comandar os 12 eixos dos manipuladores simultaneamente, limitando-se a 11 (HUNAN Betrun Robot Co., Ltd., 2022).

Vale ressaltar, porém, a capacidade da célula de realizar operações de reorientação com um manipulador robótico, enquanto o outro realiza deposição de material. Tais operações são possibilitadas por meio da interface gráfica desenvolvida por Kuner et al. (2025), na qual a sequência de variáveis é informada pelo usuário para que o protocolo *Modbus* possa conduzir a operação adequadamente. A interface é exibida na Figura 7.

Figura 7 – Interface gráfica para coordenação de movimentos



Fonte: (KUNER et al., 2025)

Quanto aos demais equipamentos necessários para a realização do processo WAAM por meio de GMAW, utilizou-se arame AWS ER70S-6 de diâmetro 1,0 mm como material de adição, chapas de aço ASTM A36 de espessura 1/4 pol como substrato e mistura de 75% de Ar (argônio) e 25% de CO₂ (dióxido de carbono) como gás de proteção.

Por fim, é relevante explicitar a versão utilizada do *software* CAM ENCY, visto que algumas funcionalidades de operações podem ser diferentes para versões anteriores ou futuras. A versão utilizada durante todo o desenvolvimento do projeto foi a "1.5 Revisão ga.0 x64 GA", por meio de uma licença estudantil proporcionada por Comac Indústria e Comércio de Automação e Robótica Ltda.

4 DESENVOLVIMENTO

Neste capítulo são apresentadas em detalhes as atividades realizadas durante o desenvolvimento do trabalho.

4.1 Configuração do *software* *ENCY*

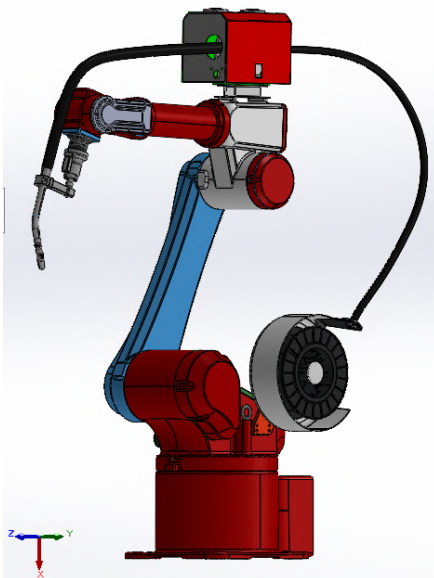
Para que o ambiente CAM possa ser utilizado na geração de trajetórias de manipuladores robóticos, é necessário estabelecer uma célula digital fidedigna em relação ao sistema real. Para isso, o *software* *ENCY* dispõe da ferramenta de construção de máquinas (*Machine Maker*), na qual podem ser posicionados manipuladores robóticos, ferramentas de trabalho e objetos fixos.

4.1.1 Criação do esquema de máquina

Primeiramente, utilizou-se como base para a célula virtual o arquivo .STEP dos robôs fornecido pelo fabricante. Entretanto, foi necessário adequá-lo, pois o *Machine Maker* prevê uma orientação específica dos eixos para configurar a cinemática do manipulador. A Figura a seguir apresenta o modelo original e a versão adaptada.

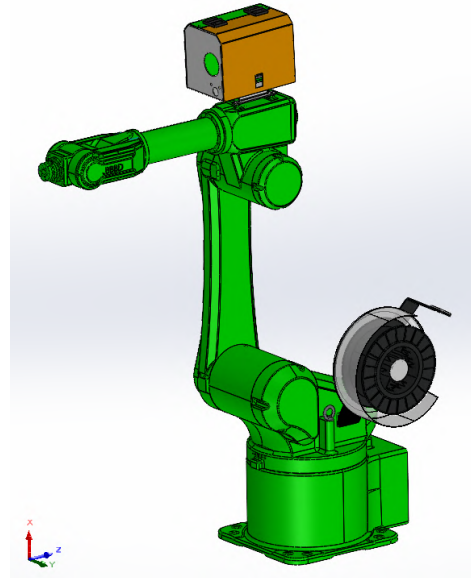
Figura 8 – Modelos CAD do robô LH1500-C-6

(a) Modelo STEP do robô LH1500-C-6



Fonte: (LBBBD Robots, 2024)

(b) Modelo adaptado para o *Machine Maker*



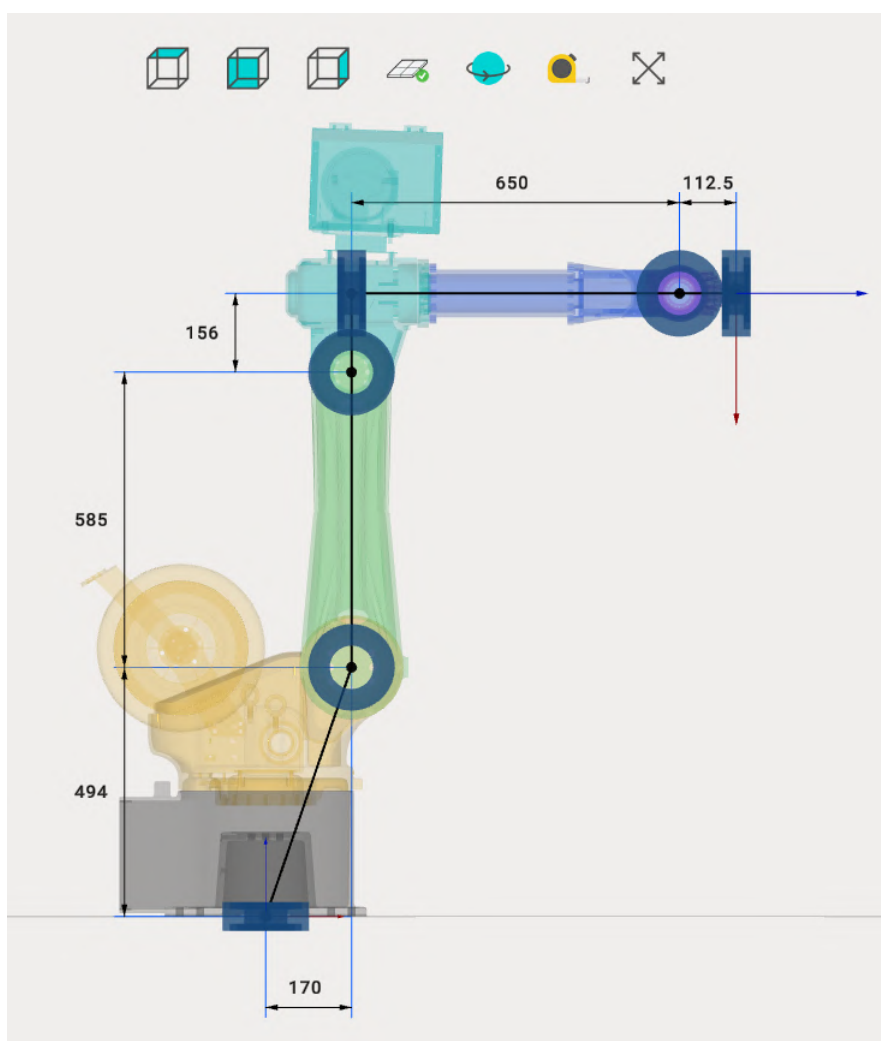
Fonte: Elaboração própria (2026)

Para configurar a cinemática no *Machine Maker*, foi necessário fornecer as distâncias entre as juntas, a partir das quais o *software* atribui os parâmetros de D-H. Embora LBBBD Robots (2024) disponibilize as dimensões do robô, optou-se por verificá-las aproximadamente no braço robótico físico com uma trena.

As medições revelaram uma diferença significativa no comprimento do elo L_1 , que conecta J2 a J3. Segundo o modelo CAD fornecido pela LBBBD Global, esse elo deveria medir 650 mm; no braço físico, mediu-se aproximadamente 585 mm.

Para que a célula virtual representasse adequadamente o sistema real, alterou-se no arquivo CAD o comprimento do elo entre J2 e J3. Em seguida, atribuíram-se as distâncias no *Machine Maker*, conforme a Figura 9.

Figura 9 – Atribuição de distâncias entre juntas no *Machine Maker*



Fonte: Elaboração própria (2026)

Adicionalmente, ao configurar os limites angulares, observou-se que os valores informados por LBBBD Robots (2024) para J2 e J3 não coincidiam com aqueles exibidos pelo controlador. A verificação foi realizada mediante a movimentação individual de cada junta até seu limite de operação. A Tabela 2 apresenta as discrepâncias observadas.

Com base nesse processo e na definição do sentido de rotação das juntas,

Tabela 2 – Discrepância dos limites de juntas

Junta	Informado por <i>LBBBD</i>	Verificado pelo autor
J1	$\pm 165^\circ$	$\pm 165^\circ$
J2	$+60^\circ / - 50^\circ$	$+85^\circ / - 58^\circ$
J3	$+60^\circ / - 80^\circ$	$+80^\circ / - 85^\circ$
J4	$\pm 175^\circ$	$\pm 175^\circ$
J5	$+30^\circ / - 215^\circ$	$+30^\circ / - 215^\circ$
J6	$\pm 360^\circ$	$\pm 360^\circ$

obteve-se um modelo cinemático inicial. A Tabela 3 apresenta seus parâmetros de D-H.

Tabela 3 – Parâmetros de D-H

Sistema de coordenadas	θ_i	α_i	L_i	d_i
1	θ_1	90°	d_1	0
2	$\theta_2 + 90^\circ$	0°	L_1	d_3
3	$\theta_3 - 90^\circ$	0°	L_2	0
4	θ_4	90°	0	0
5	$\theta_5 - 90^\circ$	90°	0	0
6	$-\theta_6 + 180^\circ$	0°	0	0

Além dos parâmetros apresentados, é necessária uma transformação adicional entre os sistemas de coordenadas 3 e 4 para representar a conexão entre o conjunto formado por ombro, braço e cotovelo, de J1 a J3, e o pulso esférico, formado por J4, J5 e J6. Para isso, foram adicionadas as seguintes transformações:

$${}^0T_6 = {}^0T_3 \cdot \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & d_2 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot {}^4T_6 \quad (3)$$

Adicionalmente, a transformação resultante desses comprimentos de elo, correspondente à posição inicial (*Home*), na qual todos os ângulos de junta são nulos, pode ser apresentada pela matriz a seguir.

$${}^0T_6 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 820 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1122,5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Em seguida, os robôs foram posicionados no espaço da célula com base em medições iniciais realizadas com uma trena. Como a incerteza dessas medições

prejudicava a representação da célula, optou-se por calcular a transformação entre os sistemas de coordenadas das bases dos manipuladores. Para isso, utilizou-se em ambos os robôs a ferramenta GMAW, com seu respectivo TCP, para tocar um mesmo ponto no espaço. A partir das posições cartesianas e dos ângulos de rotação de cada robô, expressos por X , Y , Z , rolagem, arfagem e guinada (*roll*, *pitch* e *yaw*), calculou-se a transformação entre as bases. Nas equações a seguir, os índices s e m identificam, respectivamente, os robôs soldador e manipulador.

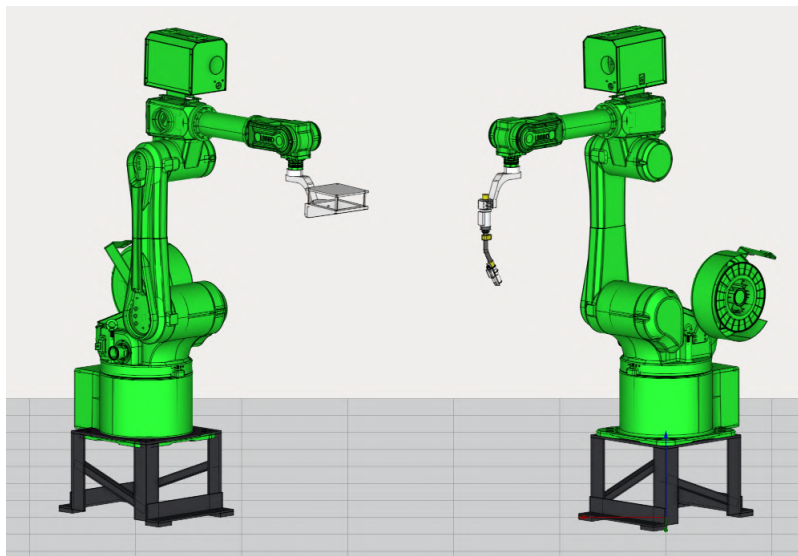
$${}^{0s}T_{0m} = {}^{0s}T_{6s} \cdot {}^{6s}T_{6m} \cdot {}^{6m}T_{0m} \quad (5)$$

A matriz de transformação ${}^{6s}T_{6m}$ representa uma rotação pura e determina a orientação relativa entre os sistemas de coordenadas dos braços. Com base em uma medição realizada com esquadro, adotou-se uma rotação de 90° em torno de Z . A matriz resultante, inserida no *Machine Maker*, é apresentada a seguir.

$${}^{0s}T_{0m} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 1352,061 \\ 1 & 0 & 0 & -1447,596 \\ 0 & 0 & 1 & 1,583 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Por fim, os dois robôs da célula virtual foram equipados com suas respectivas ferramentas de trabalho, às quais se atribuíram os TCPs exportados dos controladores. A Figura 10 apresenta a disposição resultante.

Figura 10 – Disposição dos robôs na célula virtual

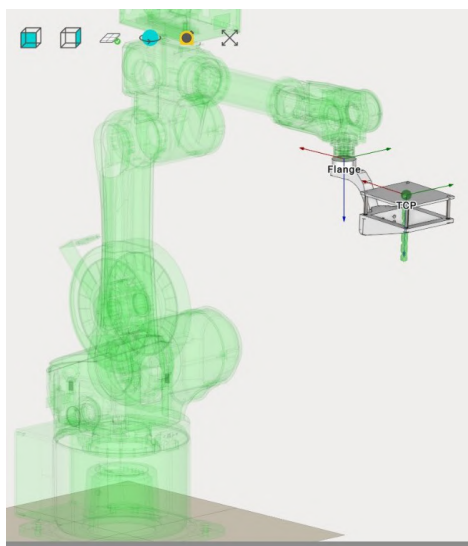


Fonte: Elaboração própria (2026)

Como os modelos CAD das ferramentas foram elaborados com base em medições manuais, observa-se uma diferença visual entre o TCP real, cuja transformação foi exportada dos controladores, e sua representação virtual, conforme evidenciado nas Figuras 11a e 11b.

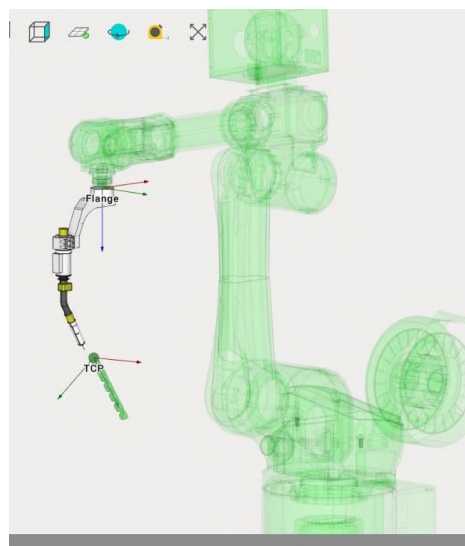
Figura 11 – Ferramentas dos robôs

(a) Ferramenta de suporte de chapas e seu TCP



Fonte: Elaboração própria (2026)

(b) Tocha GMAW e seu TCP



Fonte: Elaboração própria (2026)

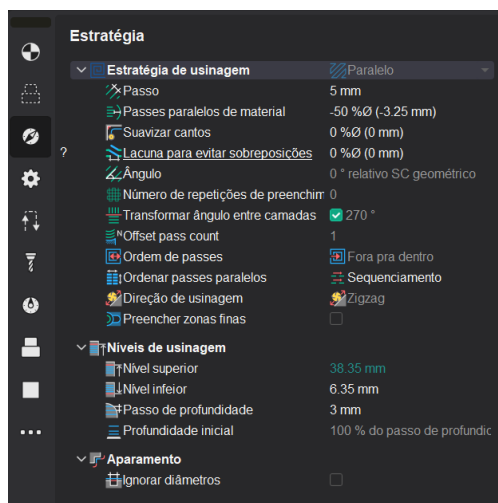
4.1.2 Configuração das operações de trabalho

No ambiente virtual do *ENCY*, utiliza-se a aba "Programação" para definir as operações necessárias à fabricação da peça. Nas operações subtrativas tradicionais, emprega-se um modelo CAD da geometria final, em formatos como OBJ, STEP ou SLDPRT, e o *software* atribui uma matéria-prima bruta a ser usinada. Nas operações aditivas, utiliza-se um arquivo de estereolitografia, no formato STL, como referência geométrica.

Entre as operações aditivas disponibilizadas no *ENCY*, aquelas que melhor atenderam aos requisitos do projeto foram "Adição 3D" e "Fatiamento não planar" (*non-planar slicing*), em razão das estratégias nativas de adição e dos parâmetros disponíveis para configuração. As Figuras 12a e 12b apresentam as respectivas interfaces.

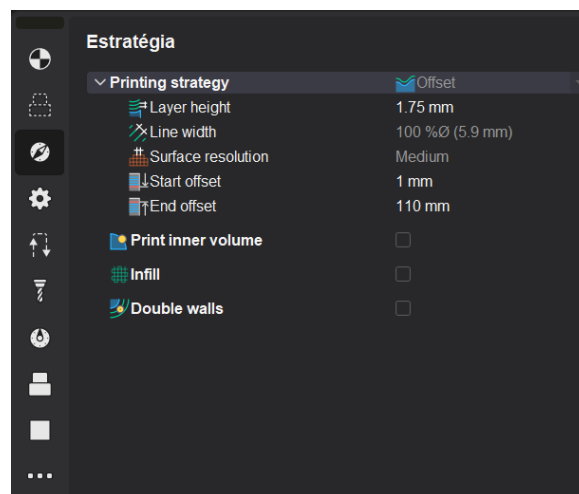
Figura 12 – Parâmetros das operações aditivas

(a) Adição 3D



Fonte: Elaboração própria (2026)

(b) Fatiamento não planar



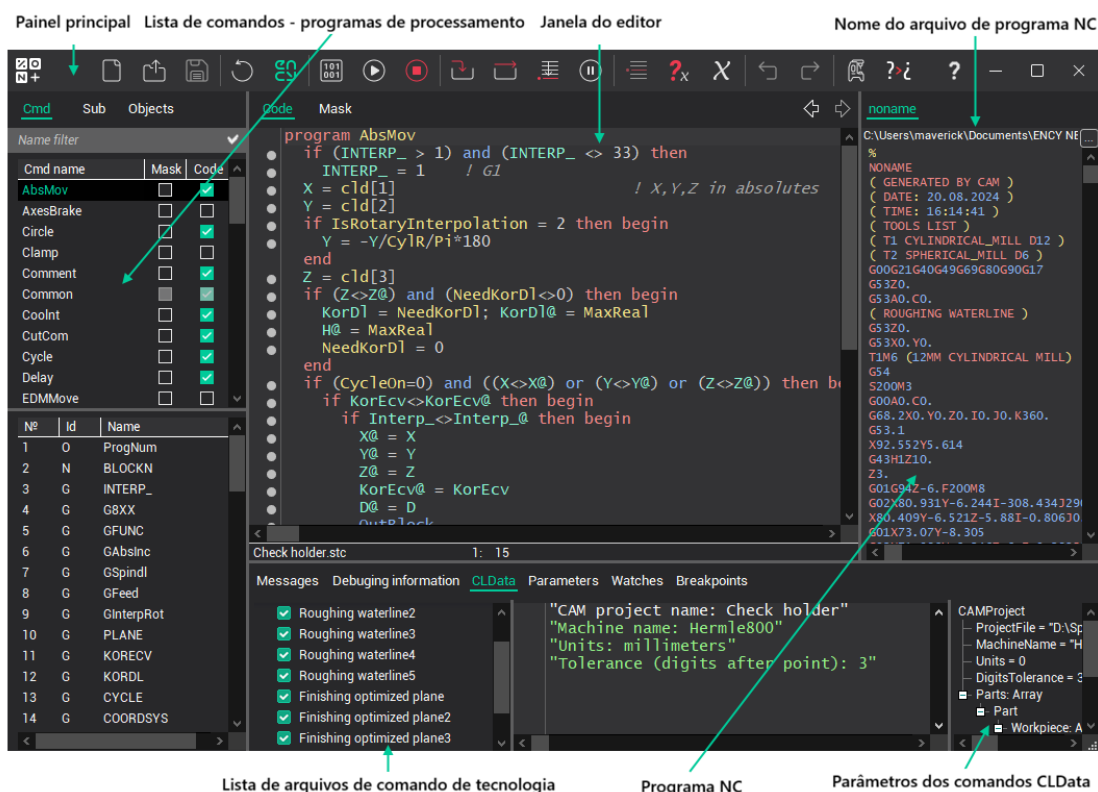
Fonte: Elaboração própria (2026)

Dessa forma, foi possível adequar as operações às propriedades do cordão de solda e à estratégia de deposição, detalhadas na Seção 4.4.

4.2 Desenvolvimento do pós-processador para robôs LBBBD

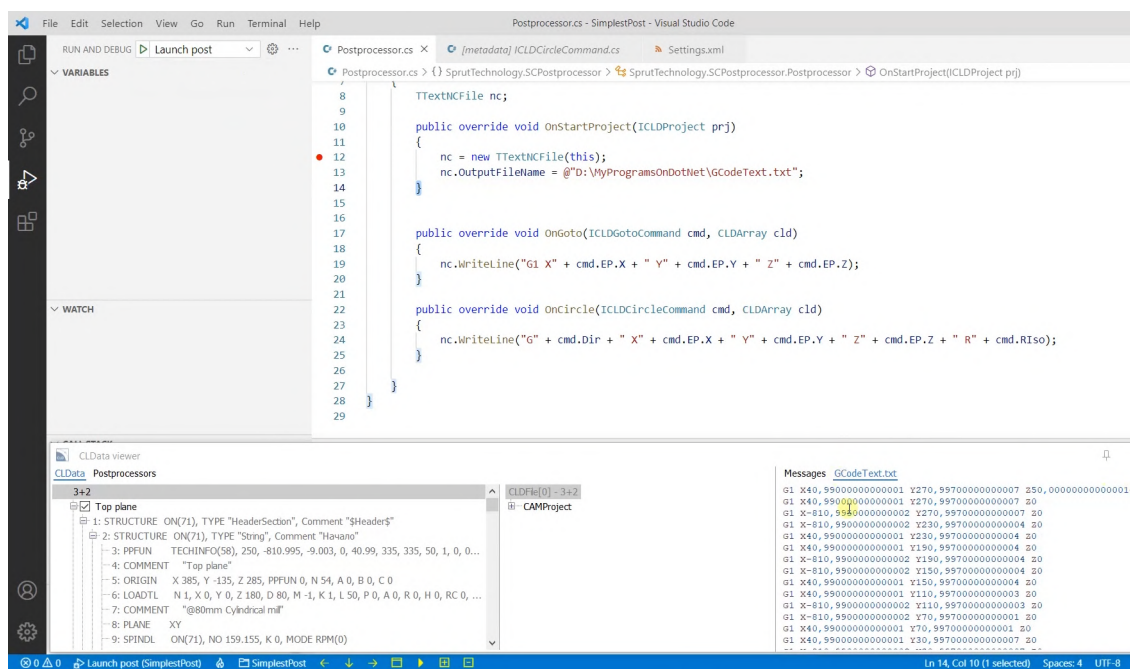
Conforme explicado na Seção 2.2.3, um dos motivos para a escolha do *ENCY* como solução CAM foi a possibilidade de criar pós-processadores personalizados. Essa funcionalidade é disponibilizada em dois ambientes: o gerador de pós-processadores (*Postprocessor Generator*), que utiliza linguagem própria e ambiente nativo do *ENCY*, e o sistema aberto baseado na plataforma *.NET*, que emprega a linguagem *C#* no *Visual Studio Code*.

Esses ambientes disponibilizam funções para converter o *CLData* gerado pelo *ENCY* na sintaxe esperada pelo controlador. As respectivas interfaces são apresentadas nas figuras a seguir.

Figura 13 – Interface gráfica do *Postprocessor Generator*

Fonte: (ENCY, 2026)

Figura 14 – Interface do Visual Studio Code para desenvolvimento



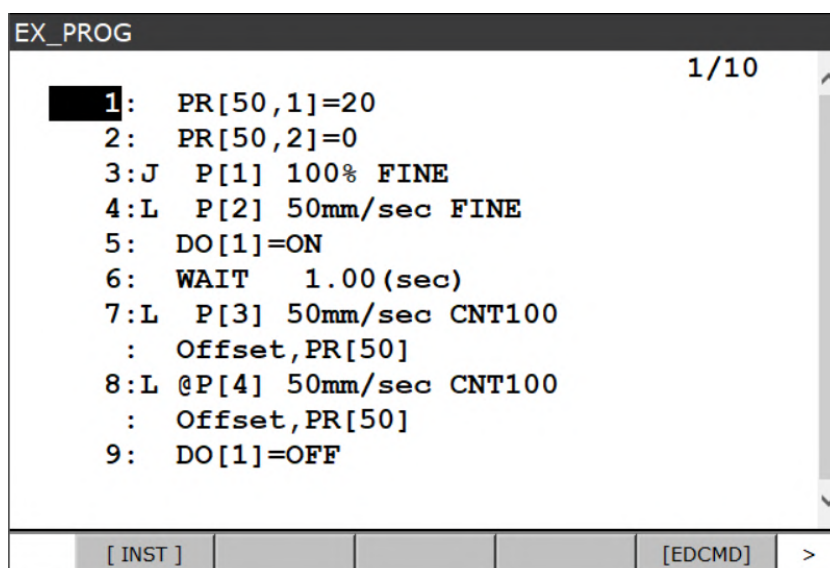
Fonte: (SprutCAM Tech Ltd., 2021)

Ambos os ambientes são adequados ao desenvolvimento. O primeiro está associado às versões iniciais do *ENCY*, anteriormente denominado *SprutCAM*, enquanto o segundo utiliza uma linguagem de programação orientada a objetos. As bibliotecas de pós-processadores disponibilizadas nativamente pelo *ENCY*, contudo, são diretamente compatíveis com o *Postprocessor Generator*.

Para reduzir o tempo de desenvolvimento, utilizou-se a biblioteca de pós-processadores para braços robóticos como base para o arquivo personalizado do controlador *Betrún*, utilizado pelos robôs da *LBBBD*. Devido ao conhecimento prévio do autor sobre controladores robóticos *FANUC*, selecionou-se o pós-processador desse fabricante como ponto de partida.

Para evidenciar as diferenças entre as sintaxes de programação, as Figuras 15 e 16 apresentam exemplos de programas para os dois controladores.

Figura 15 – Programa para robô *FANUC*



```
EX_PROG 1/10
1: PR[50,1]=20
2: PR[50,2]=0
3:J P[1] 100% FINE
4:L P[2] 50mm/sec FINE
5: DO[1]=ON
6: WAIT 1.00(sec)
7:L P[3] 50mm/sec CNT100
: Offset,PR[50]
8:L @P[4] 50mm/sec CNT100
: Offset,PR[50]
9: DO[1]=OFF
```

[INST] [EDCMD] >

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Figura 16 – Programa para robô LBBBD

Run	PLC	System	Run - Ex_Prog
			Ex_Prog
1			Global variable operation : GV_200 = 20
2			Global variable operation : GV_201 = 0
3			Curve : Joint movement - Run to point(212_Ex_PAUTO0) - Speed = 2000 - Smoothing ratio=0
4			Curve : Linear movement - Run to point(213_Ex_PAUTO1) - Speed = 50 - Smoothing ratio=0
5			Output : Y1 = 1
6			Delay : 1000
7			Begin section offset : Tool coordinate System
8			Curve : Linear movement - Run to point(214_Ex_PAUTO2) - Speed = 50 - Smoothing ratio=100
9			Curve : Linear movement - Run to point(215_Ex_PAUTO3) - Speed = 50 - Smoothing ratio=100
10			End section offset
11			Output : Y1 = 0

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Para adequar o pós-processador ao controlador *Betrún*, editaram-se as rotinas associadas a cada comando do CLData. Algumas modificações consistiram na tradução direta entre comandos, conforme exemplificado na Tabela 4. Outras exigiram tratamento adicional, como a separação de um comando MULTIGOTO de 12 eixos, que descreve o movimento simultâneo dos dois robôs, em dois movimentos destinados a arquivos distintos, pois a célula não executa movimentos síncronos entre os braços.

Tabela 4 – Exemplo de tradução de comandos

Linguagem	Comando	Exemplo
CLData	MULTIGOTO	MULTIGOTO <eixos> <valores>
FANUC LS	L	L P[ponto] velocidade mm/s
Betrún	Curve: Linear	Curve: Linear; point[ponto]; speed[velocidade]

4.3 Desenvolvimento do compilador para os programas

Tabela 5 – Estrutura de arquivos do controlador *Betrún*

Nome	Formato	Função
programs	Binário (.raw)	Programas organizados por linhas de comandos
Point	Binário (.dat)	Registrar posição, nomes e IDs dos pontos
UserCoordSys	Binário (.dat)	Registrar posição, nomes e IDs dos sistemas do usuário
ToolCoordSys	Binário (.dat)	Registrar posição, nomes e IDs dos sistemas de ferramenta
TeachRecord	Binário (.dat)	Registrar nomes e IDs dos programas
WeldRecord	Binário (.dat)	Registrar nomes e IDs dos arquivos de soldagem
WaveRecord	Binário (.dat)	Registrar nomes e IDs dos arquivos de tecimento

Os arquivos utilizados pelo controlador *Betrún* são armazenados em formato binário e foram inspecionados por meio de sua representação hexadecimal. Por esse motivo, os arquivos de texto simples gerados pelo pós-processador do *ENCY* precisam ser convertidos antes de serem interpretados pelo controlador.

Para que um *script* pudesse gerar os arquivos de forma consistente, foi necessário mapear a função de cada byte de sua estrutura.

Adotou-se, portanto, uma abordagem baseada em programas elaborados no próprio controlador. Em vez de criar cada arquivo integralmente, o compilador modifica e adiciona linhas de operação a esses modelos. O procedimento mostrou-se relativamente simples para os arquivos *.dat*, cuja estrutura contém números de identificação, valores e nomes de programas ou pontos. Os textos são representados pelo Código Padrão Americano para o Intercâmbio de Informações (*American Standard Code for Information Interchange*, ASCII).

Em contrapartida, os arquivos de programa *.raw* apresentam maior complexidade, pois codificam diversas operações e seus respectivos parâmetros. Para identificar como cada comando era armazenado, exportaram-se programas com a variação de um parâmetro por vez e compararam-se os arquivos byte a byte.

Como essa comparação é repetitiva e sujeita a erros manuais, usou-se o agente de programação *Codex*, da *OpenAI*, para auxiliar no mapeamento dos arquivos e na implementação do compilador. Durante o desenvolvimento, utilizaram-se modelos da série GPT 5.2 a GPT 5.5. Os resultados gerados foram verificados pela comparação dos arquivos e por sua visualização no programa *Betrún ProgramView*, o qual foi disponibilizado pela *LBBBD Global* e que permite visualizar em um computador a estrutura dos arquivos do controlador *Betrún*. A Figura 17 apresenta sua interface.

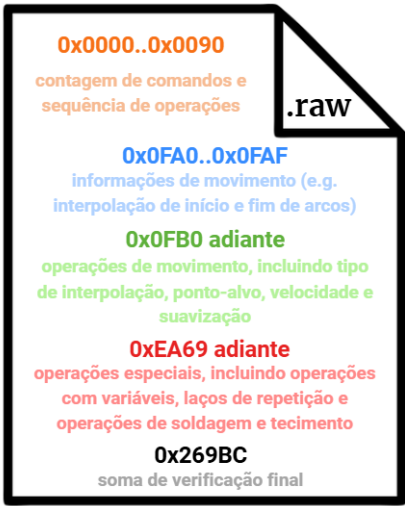
Figura 17 – Programa *ProgramView*

程序名称	任务详情
32 Remelt_Tower	等待全局变量(值) : GV_400 == 1
33 rmtest	曲线 : 关节运动 - 运动至点(321_Cube30x3Auto0) - 速度=1000 - 平滑比=0
34 R1_SHORTSEMICIRCC...	全局变量操作 : GV_400 = 0
35 R1_SHORTSEMICIRCC...	等待全局变量(值) : GV_401 == 1
36 out_ascii04	曲线 : 关节运动 - 运动至点(322_Cube30x3Auto1) - 速度=1000 - 平滑比=0
37 out_ascii05	曲线 : 关节运动 - 运动至点(323_Cube30x3Auto2) - 速度=1000 - 平滑比=0
38 out_ascii17	曲线 : 直线运动 - 运动至点(324_Cube30x3Auto3) - 速度=1000 - 平滑比=0
39 out_ascii18_prepatch	曲线 : 直线运动 - 运动至点(325_Cube30x3Auto4) - 速度=8 - 平滑比=100
40 out_ascii18	曲线 : 直线运动 - 运动至点(326_Cube30x3Auto5) - 速度=100 - 平滑比=0
41 out_ascii18_nomisc	启动焊接
42 R1_SSC_smallerfile	曲线 : 直线运动 - 运动至点(327_Cube30x3Auto6) - 速度=8 - 平滑比=0
43 R1_ShortBlockContour	曲线 : 直线运动 - 运动至点(328_Cube30x3Auto7) - 速度=8 - 平滑比=0
44 weld_test	曲线 : 直线运动 - 运动至点(329_Cube30x3Auto8) - 速度=8 - 平滑比=0
45 weldtest2	曲线 : 直线运动 - 运动至点(330_Cube30x3Auto9) - 速度=8 - 平滑比=0
46 COOLSHORTBLO	曲线 : 直线运动 - 运动至点(331_Cube30x3Auto10) - 速度=8 - 平滑比=0
47 PulseLaser	停止焊接
48 COOLCUBE30X3	全局变量操作 : GV_301 = 1
49 R1_Cube30x30	子程调用 : COOLCUBE30X3
50 COOLSTANDARD	曲线 : 直线运动 - 运动至点(332_Cube30x3Auto11) - 速度=100 - 平滑比=0

Fonte: (LBBBD Robots, 2024)

A Figura 18 apresenta uma representação simplificada da codificação dos comandos nos arquivos `.raw`. A lista completa da codificação empregada pelo controlador *Betrún* encontra-se no Apêndice B.

Figura 18 – Estrutura simplificada dos arquivos `.raw`



Fonte: Elaboração própria (2026)

O fluxo de desenvolvimento utilizando o programa *Betrún ProgramView* reduziu o tempo de verificação do *script*, pois permitiu inspecionar cada iteração de compilação antes dos testes no controlador físico e aplicar as correções necessárias.

4.4 Definição dos parâmetros de soldagem

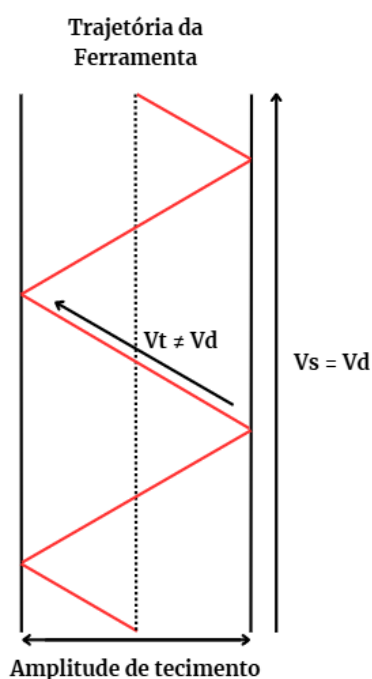
Quanto aos parâmetros de soldagem empregados na produção das peças por WAAM, adotaram-se como ponto de partida os valores utilizados por Teichmann et al. (2026). Em seguida, conduziram-se ensaios para verificar sua reprodutibilidade com a fonte de soldagem *OTC CPVE400* disponível na célula.

Os ensaios indicaram a necessidade de ajustar os parâmetros para reproduzir a geometria de cordão adotada no estudo. Além da diferença entre as fontes de soldagem, considerou-se que o comprimento do cabo negativo poderia contribuir para essa necessidade. Em razão da disposição da célula, o cabo utilizado mede aproximadamente 5 m, enquanto aquele empregado por Teichmann et al. (2026) media cerca de 2 m. Durante os ensaios, foi necessário elevar a tensão da fonte *OTC CPVE400* para obter um arco estável e com pouco respingo.

Também se avaliaram os parâmetros ajustados em conjunto com a estratégia de tecimento (*weaving*), com o objetivo de reduzir a relação R/L e aumentar os ângulos entre o substrato e as bordas do cordão, conforme recomendado por Teichmann et al. (2026). Nos controladores testados, observou-se que o *Betrún* calcula o tecimento de forma diferente do controlador *FANUC*. As Figuras 19a e 19b ilustram essa diferença.

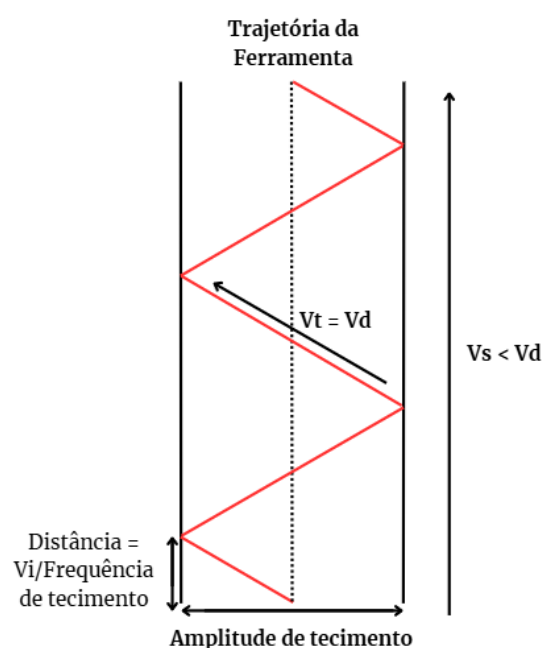
Figura 19 – Comportamento da função de tecimento em diferentes controladores

(a) Controlador *FANUC* M10iA



Fonte: Elaboração própria (2026)

(b) Controlador *Betrún* v5.0



Fonte: Elaboração própria (2026)

A principal diferença observada está na definição da velocidade de deslo-

camento da ferramenta durante o tecimento. No controlador *FANUC* testado, a velocidade de deslocamento V_d é igual à velocidade de soldagem V_s , isto é, mantém-se a velocidade entre os pontos inicial e final, enquanto a velocidade para alcançar os extremos do tecimento, V_t , varia conforme a amplitude e a frequência. No controlador *Betrun*, V_d permanece constante durante o deslocamento até esses extremos, o que reduz V_s em relação ao movimento sem tecimento. Consequentemente, a frequência de tecimento e a velocidade de soldagem ficam condicionadas uma à outra.

Devido à diferença apresentada, optou-se por não utilizar o tecimento nos cordões para a fabricação de peças, com o intuito de preservar a velocidade de soldagem (V_s) ao longo de cada cordão e ter maior previsibilidade quanto ao volume de material depositado.

A Tabela 6 apresenta os parâmetros selecionados para a fabricação das peças por WAAM. Os símbolos V_a e V_s representam, respectivamente, as velocidades do arame e de soldagem; DBCP corresponde à distância do bico de contato à peça.

Tabela 6 – Parâmetros de soldagem

Tensão (V)	Corrente (A)	V_a (m/min)	V_s (m/min)	DBCP (mm)
Parâmetros base de Teichmann et al. (2026)				
18,0	120	4,2	0,33	16,00
Parâmetros ajustados pelo autor				
20,5	160	8,7	0,48	16,00

Entre as mudanças realizadas, destacam-se o aumento da corrente, empregado para ampliar a largura do cordão e tentar compensar a ausência de tecimento, e o aumento de V_s , destinado a evitar que o material adicional resultasse em uma relação R/L elevada. Dessa forma, obteve-se o cordão apresentado na Figura 20, com largura $L = 6,75$ mm e reforço $R = 3,51$ mm, resultando em uma relação R/L de 0,52. Esse valor é próximo ao utilizado nos cordões de contorno de Teichmann et al. (2026), de 0,42, porém muito acima da relação de 0,28 obtida nos cordões de preenchimento com uso de tecimento.

Figura 20 – Cordão com parâmetros ajustados

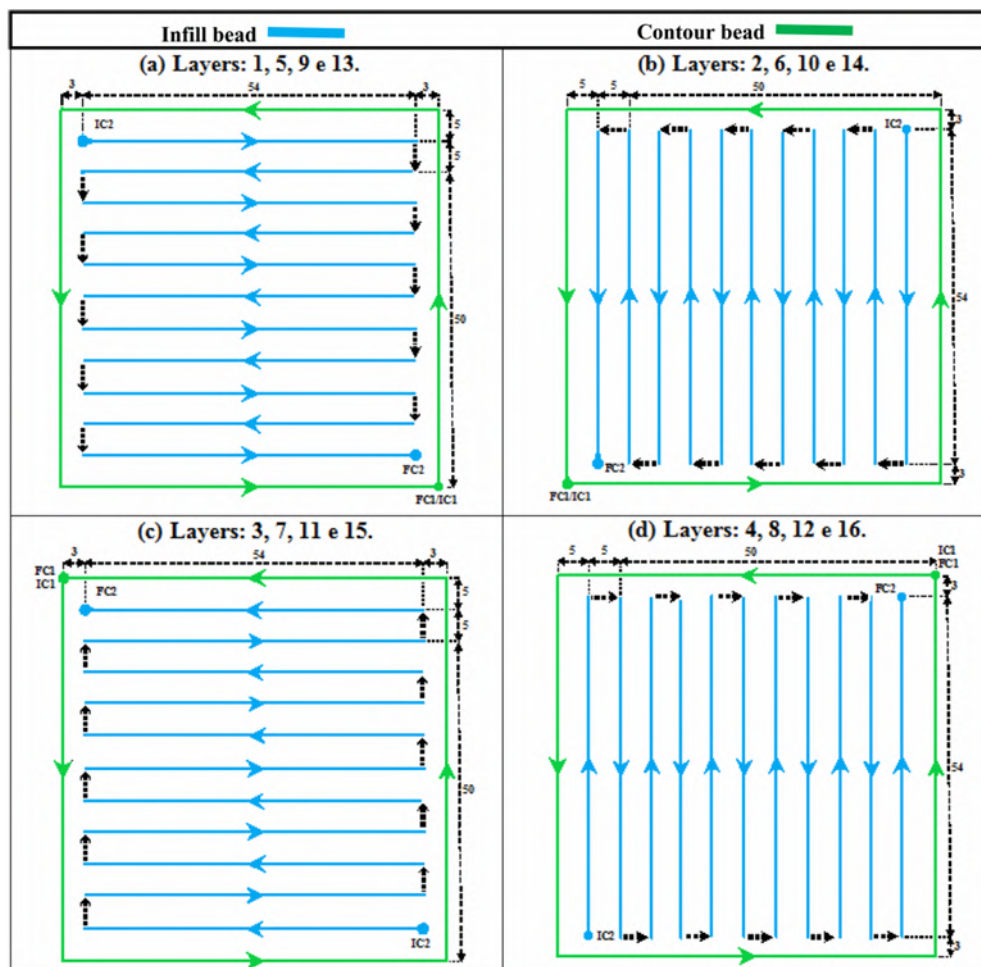
Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Ademais, os valores escolhidos para esse ajuste foram baseados nos ensaios conduzidos por Teichmann e Mussi (2026), os quais validaram que essa combinação de parâmetros de corrente e velocidade de soldagem não ocasionou defeitos como escorrimento de material ou *humping*. As medições de geometria do cordão, utilizando um paquímetro digital *MTX*, com resolução de 0,01 mm, e a configuração completa realizada no controlador *Betrún* para os parâmetros de soldagem são apresentadas no Apêndice A.

4.4.1 Estratégia de deposição

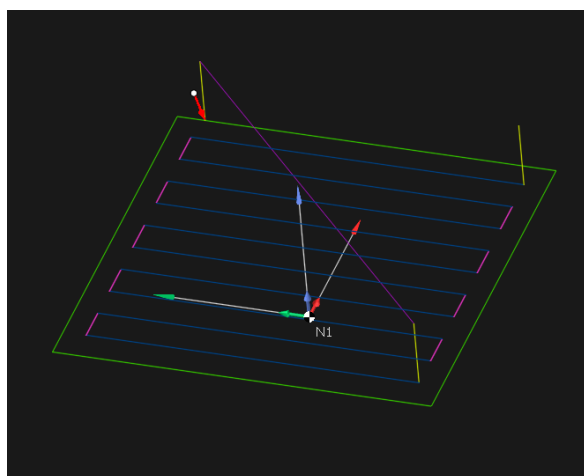
Quanto à deposição de múltiplas camadas, adotaram-se cordões de preenchimento equidistantes e a reorientação das trajetórias em 90° a cada camada subsequente. Essa estratégia, descrita por Verlinde et al. (2021) e testada por Teichmann et al. (2026), visa minimizar deformações assimétricas mediante a alternância da direção e do sentido de deposição, conforme a Figura 21.

Figura 21 – Estratégia de deposição de camadas

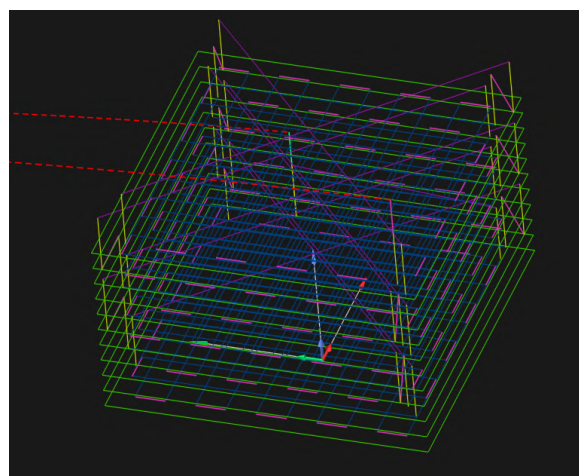


Fonte: (TEICHMANN et al., 2026)

De maneira correspondente, a operação de "Adição 3D", descrita em 4.1.2, produz trajetórias de deposição compatíveis com a estratégia escolhida. A Figura 22a ilustra o caminho de ferramenta gerado pelo *ENCY* para a primeira camada da peça, enquanto a Figura 22b apresenta as trajetórias da deposição completa da peça.

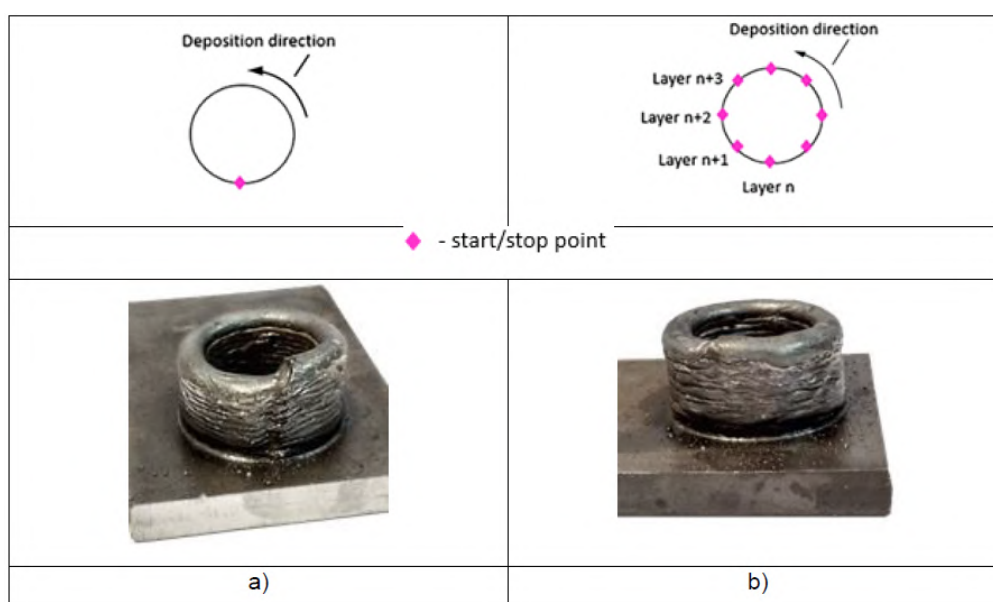
Figura 22 – Trajetória calculada pelo *ENCY***(a) Primeira camada**

Fonte: Elaboração própria (2026)

(b) Todas as camadas

Fonte: Elaboração própria (2026)

Para trajetórias circulares, Verlinde et al. (2021) estabelecem princípios semelhantes para reduzir as deformações geométricas. De maneira equivalente, a operação de "Adição 3D" permite esse comportamento de trajetórias ao determinar o valor da rotação entre camadas. A Figura 23 apresenta uma das estratégias adotadas para a fabricação de geometrias desse tipo.

Figura 23 – Estratégia de deposição de camadas circulares

Fonte: (VERLINDE et al., 2021)

Por fim, para estratégias de deposição de paredes finas, Verlinde et al. (2021) estabelecem a necessidade de intercalar a direção de deposição entre ca-

madras, conforme a Figura 24.

Figura 24 – Estratégia de deposição de paredes finas



Fonte: (VERLINDE et al., 2021)

Embora a operação de "Adição 3D" possa reproduzir esse comportamento para deposições em substratos planos, a operação de fatiamento não planar (*non-planar slicing*) é incapaz de reproduzir esse comportamento em trajetórias realizadas sobre substratos não planares.

4.5 Ensaios de correspondência entre as células virtual e real

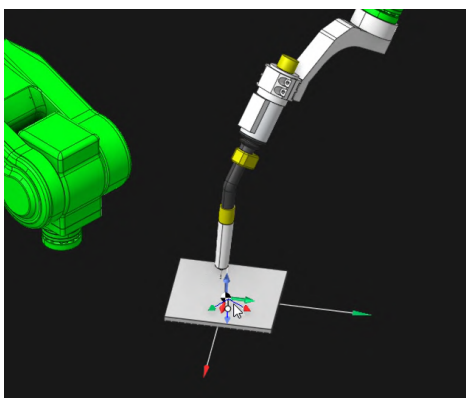
Para avaliar a correspondência entre as operações simuladas no *ENCY* e sua execução no sistema real, foram conduzidos ensaios de posicionamento e de ajuste cinemático.

4.5.1 Correções de posicionamento

Exportou-se para o controlador robótico um programa previamente simulado no ambiente digital. Durante sua execução, identificou-se o erro de posicionamento apresentado nas figuras a seguir.

Figura 25 – Posicionamento de início de deposição

(a) Posicionamento simulado



Fonte: Elaboração própria (2026)

(b) Posicionamento real



Fonte: Elaboração própria (2026)

Para corrigir o erro observado, ajustaram-se tanto a matriz de transformação entre as bases dos robôs, apresentada na Equação 6, quanto a posição do TCP do robô manipulador, coincidente com a origem do substrato.

Com esses ajustes, o ambiente digital passou a representar a célula real com precisão suficiente para a configuração inicial de trabalho, o que possibilitou a fabricação das primeiras peças.

Contudo, ao testar configurações de trabalho substancialmente diferentes, observou-se um desvio que inviabilizava operações mais complexas. Tornaram-se, portanto, necessárias correções mais abrangentes.

4.5.2 Correções de cinemática

Diante dos erros observados, revisou-se o modelo cinemático para verificar se ele reproduzia corretamente as posições informadas pelo controlador. Foram exportados 31 pontos de cada robô, contendo os ângulos das juntas e a posição cartesiana do flange, conforme o Apêndice C. Esses dados foram comparados, por meio de um *script*, com as posições obtidas pela cinemática direta calculada a partir das dimensões dos elos.

O teste revelou uma discrepância considerável entre as posições calculadas pelo modelo e aquelas informadas pelo controlador. A Tabela 7 apresenta essa diferença na posição inicial (*Home*), na qual todos os ângulos das juntas são nulos.

Tabela 7 – Discrepância na posição de *Home*, em milímetros

Coordenada	Controlador	Modelo	Diferença (modelo – controlador)
X	820,871	820	-0,871
Y	-0,838	0	+0,838
Z	737,365	1122,5	+385,135

Embora as diferenças nas coordenadas X e Y fossem inferiores a 1 mm, a discrepância superior a 380 mm em Z indicou que a localização dos sistemas de coordenadas havia sido representada incorretamente no modelo inicial.

Para verificar o posicionamento do sistema de coordenadas do flange, criou-se um TCP com translação nula e orientação identidade, pois o controlador *Betrun* não permite movimentar a ferramenta diretamente em relação ao flange. As operações de rolagem, arfagem e guinada (*roll*, *pitch* e *yaw*) movimentaram, respectivamente, as juntas 4, 5 e 6. Esse comportamento indicou a correspondência entre o sistema de coordenadas do flange e os sistemas associados a essas juntas.

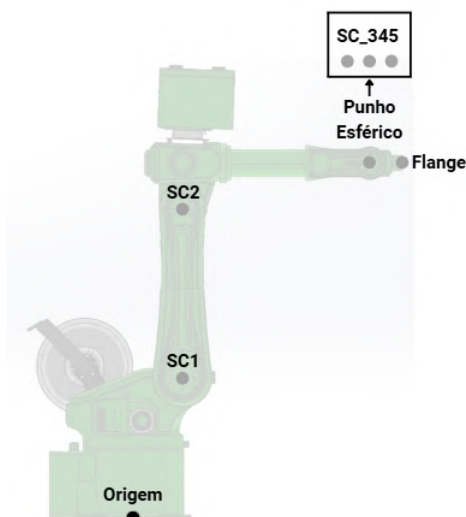
Adicionalmente, ao posicionar a ferramenta recém-criada em $Z = 0$ mm no sistema de coordenadas da base, verificou-se que a origem desse sistema, embora

centralizada em relação ao manipulador, estava na altura da junta 2, e não no plano da base física, como se havia suposto.

Essas observações indicaram que o posicionamento dos sistemas de coordenadas não correspondia à configuração inicialmente prevista na Figura 26a, mas àquela apresentada na Figura 26b. Nas figuras, SC significa sistema de coordenadas.

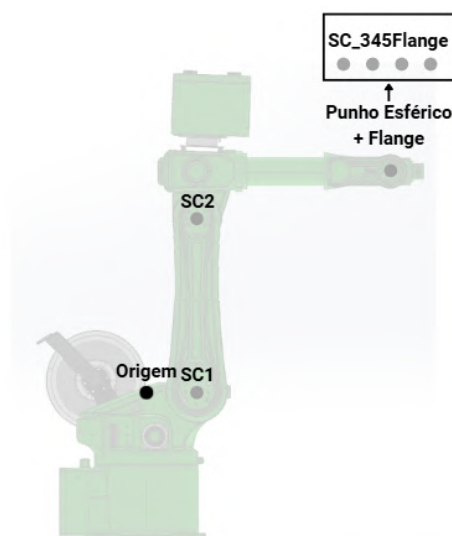
Figura 26 – Posicionamento dos sistemas de coordenadas das juntas

(a) Posicionamento previsto



Fonte: Elaboração própria (2026)

(b) Posicionamento real



Fonte: Elaboração própria (2026)

Após a atualização desses sistemas, o modelo cinemático foi novamente avaliado com os pontos de teste apresentados no Apêndice C. A Tabela 8 resume os resultados.

Tabela 8 – Verificação de modelo cinemático

Número de pontos	Erro médio (mm)	Desvio padrão (mm)	Erro máximo (mm)
31	3,473	0,511	4,751

Após a correção do posicionamento dos sistemas de coordenadas, o erro máximo foi reduzido para aproximadamente 4,75 mm. Esse valor ainda era superior à repetibilidade nominal de $\pm 0,03$ mm informada pelo fabricante (LBBBD Robots, 2024). Embora as duas grandezas não sejam equivalentes, a ordem de grandeza dos resíduos serve como comparação para indicar o quão próximo o modelo reproduz a transformação cartesiana utilizada pelo controlador, para os pontos utilizados no teste.

Em seguida, ajustaram-se os parâmetros geométricos do modelo para reduzir as diferenças entre as posições calculadas pela cinemática direta e as coordenadas cartesianas informadas pelo controlador. Para cada ponto de referência, foram utilizados os valores articulares e a posição cartesiana correspondente do flange. O

procedimento foi implementado em um *script* em *Python* e formulado como um ajuste por mínimos quadrados, no qual se estimaram pequenas correções nos parâmetros de D-H a partir dos resíduos entre o modelo e os dados exportados do controlador.

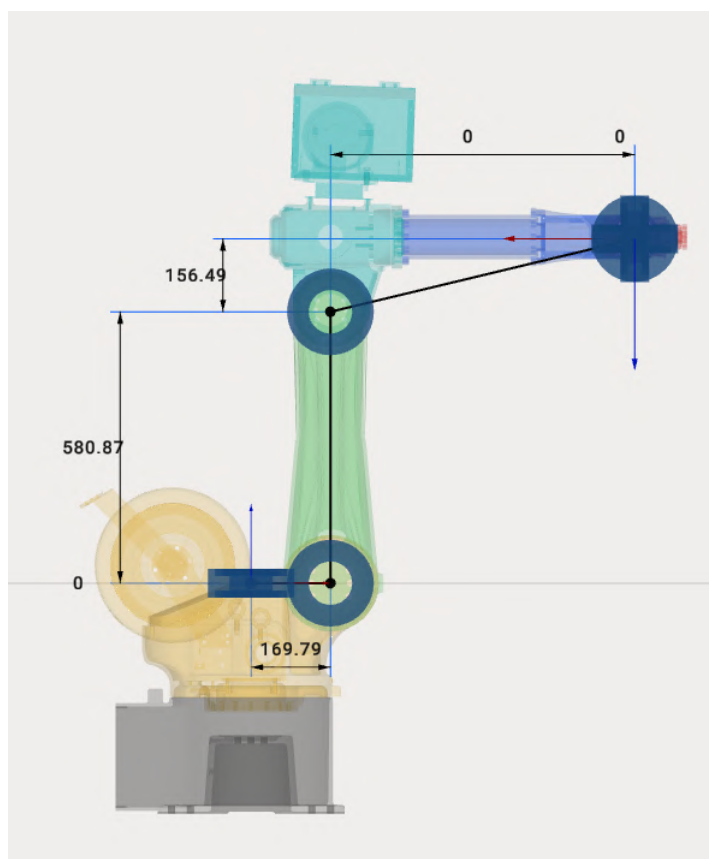
Os parâmetros resultantes foram avaliados nos mesmos 31 pontos empregados no ajuste. A Tabela 9 apresenta os resultados principais, e o Apêndice C contém os dados completos.

Tabela 9 – Verificação de modelo cinemático atualizado

Número de pontos	Erro médio (mm)	Desvio padrão (mm)	Erro máximo (mm)
Primeiro modelo			
31	3,473	0,511	4,751
Segundo modelo			
31	0,002	0,006	0,034

O resíduo máximo foi reduzido de 4,751 mm para 0,034 mm, enquanto o desvio padrão passou de 0,511 mm para 0,006 mm. Assim, alcançou-se um modelo que reproduz os pontos de teste com precisão comparável à repetibilidade de $\pm 0,03$ mm dos robôs.

Com os parâmetros obtidos, atualizaram-se as informações cinemáticas no construtor de máquinas (*Machine Maker*), conforme a Figura 27.

Figura 27 – Atualização das distâncias entre juntas no *Machine Maker*

Fonte: Elaboração própria (2026)

Ao final deste processo, percebeu-se que o modelo cinemático do robô manipulador era levemente diferente daquele do robô soldador, evidenciado pela diferença nas coordenadas de *Home* dos braços robóticos.

Tabela 10 – Discrepância na posição de *Home* entre os robôs, em milímetros

Coordenada	Soldador	Manipulador	Diferença $R_s - R_m$
X	820,871	820,238	+0,633
Y	-0,838	-0,434	-0,404
Z	737,365	736,729	+0,636

Essa diferença pode decorrer tanto da montagem dos braços quanto do processo de zeramento dos eixos. Por isso, aplicou-se ao robô manipulador o mesmo procedimento utilizado no modelo do robô soldador. O Apêndice C apresenta a avaliação completa, e a Tabela 11 reúne os comprimentos finais empregados na atualização dos parâmetros de D-H.

Aplicando-se o mesmo procedimento ao robô manipulador, obteve-se resíduo máximo inferior a 0,001 mm nos 31 pontos empregados no ajuste. Esse resultado

Tabela 11 – Comprimentos ajustados dos manipuladores

Elo	Valor teórico (mm)	Robô soldador (mm)	Robô manipulador (mm)
L_1	585,000	580,867	580,926
L_2	650,000	651,083	651,190
d_1	170,000	169,789	169,049
d_2	156,000	156,497	155,804
d_3	0,000	0,838	0,434

indica que o modelo reproduz com precisão a transformação cartesiana informada pelo controlador para o conjunto analisado.

4.5.3 Correção de disposição da célula

Após a correção dos modelos cinemáticos, os erros remanescentes de posicionamento poderiam estar associados à transformação da Equação 6, calculada antes dessas correções.

Para atualizar esse cálculo, utilizaram-se múltiplos pontos de referência comuns aos dois braços, permitindo estimar com maior confiabilidade a translação e a rotação relativas. Os cálculos necessários foram realizados por meio de um *script* na linguagem *Python*.

Foram registrados sete pontos de contato comuns aos braços com a mesma ferramenta de soldagem GMAW e a mesma ponta utilizadas inicialmente. Cada robô, contudo, empregou sua própria transformação de ferramenta, em razão das diferenças identificadas entre os modelos cinemáticos.

Para cada ponto de contato, o *script* utilizou os valores articulares de cada robô, convertidos para a convenção do modelo cinemático, e aplicou a cinemática direta em conjunto com a transformação do TCP. Esse procedimento permitiu reconstruir, no referencial de cada base, as coordenadas dos pontos físicos tocados pela ferramenta.

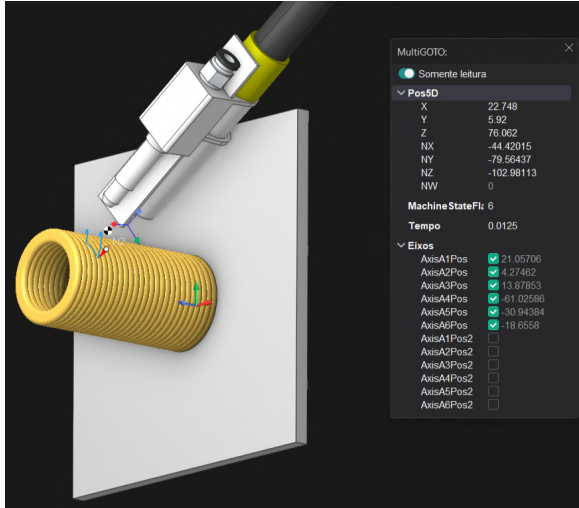
Os pares de pontos do robô soldador (R_s) e do robô manipulador (R_m) foram então tratados como medições correspondentes de um mesmo conjunto físico. A transformação relativa entre as bases foi estimada por alinhamento rígido de pontos, com cálculo dos centroides, ajuste por mínimos quadrados e decomposição em valores singulares. O *script* utilizou funções da biblioteca *NumPy* para as operações matriciais, incluindo `numpy.linalg.svd` na determinação da rotação. Após a obtenção da rotação e da translação, a transformação homogênea resultante foi avaliada pelos resíduos do ajuste e pelas distâncias entre pontos, resultando em um erro residual máximo de $\pm 13,973$ mm.

Ao testar na célula real o posicionamento calculado no *Machine Maker*,

identificou-se a necessidade de um ajuste. A comparação foi realizada entre os pontos iniciais das posições de deposição simuladas e as medições obtidas com paquímetro digital, conforme a Figura 28.

Figura 28 – Comparação entre posicionamento previsto e real

(a) Posicionamento previsto



Fonte: Elaboração própria (2026)

(b) Medição de posicionamento real



Fonte: Elaboração própria (2026)

Com base nessas comparações, realizaram-se correções iterativas para aproximar os pontos reais daqueles previstos nas operações simuladas. A Tabela 12 compara o cálculo inicial com a transformação recalculada entre as bases dos robôs. A transformação resultante do ajuste fino é apresentada na Equação 7.

Tabela 12 – Comparativo entre transformações

Coordenada	Inicial	Recalculado	Diferença
X (mm)	1352,061	1315,432	+36,629
Y (mm)	-1447,596	-1455,015	+7,419
Z (mm)	1,583	6,360	-4,777
R_x	0°	-0,059°	+0,059°
R_y	0°	-0,715°	+0,715°
R_z	90°	88,063°	+1,937°

$${}^{0s}T_{0m} = \begin{bmatrix} 0,034 & -0,999 & 0 & 1315,432 \\ 0,999 & 0,034 & 0 & -1455,015 \\ 0 & 0 & 1 & -23,000 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

O ajuste fino retornou as rotações R_x e R_y para zero e reduziu em cerca de 30 mm a translação em Z, com o objetivo de corrigir a DBCP nas posições de

soldagem simuladas. Idealmente, um número maior de pontos, distribuídos pelo volume de trabalho efetivo dos robôs, permitiria estimar com maior representatividade a disposição dos manipuladores robóticos. Além disso, a utilização de instrumentos de medição, como um relógio comparador, permitiria medir de maneira mais exata o erro no posicionamento atual dos robôs e corrigi-lo.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos.

5.1 Ambiente digital

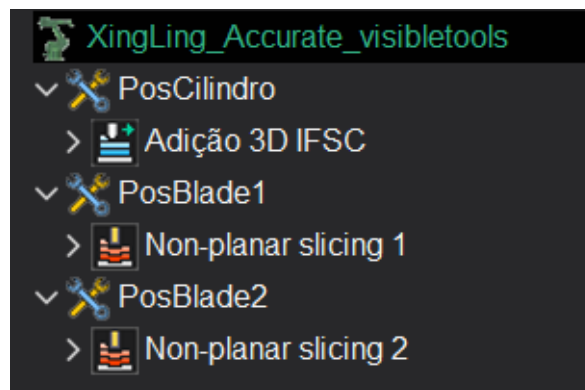
A célula virtual foi configurada com os modelos cinemáticos ajustados aos pontos de referência apresentados no Apêndice C.

5.2 Simulação de fabricação de peças

Desenvolveu-se, no *ENCY*, um fluxo de operações para simular a fabricação de peças pelo processo WAAM.

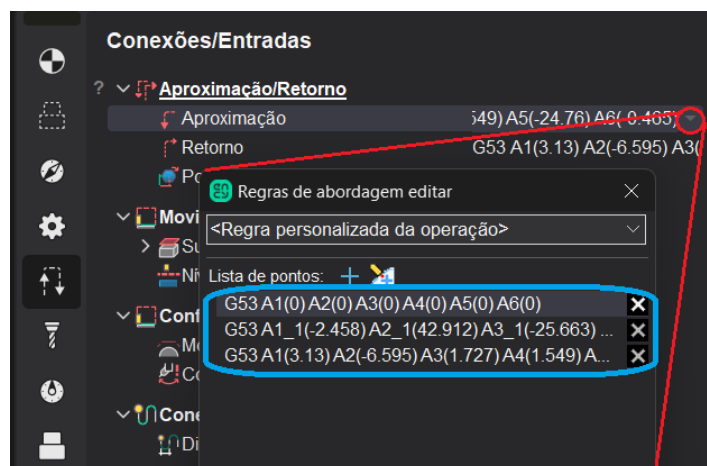
O uso de diferentes configurações de trabalho (*setups*) permitiu organizar a simulação de acordo com o posicionamento do robô manipulador. Em cada configuração, definiram-se os ângulos correspondentes à posição de trabalho desse robô. A estrutura descrita é apresentada pela Figura 29.

Figura 29 – Estrutura das configurações de trabalho



Fonte: Elaboração própria (2026)

Outro aspecto essencial foi a definição das aproximações e retrações entre as operações, pois os movimentos dos braços robóticos precisaram ser separados. Conforme apresentado na Seção 3.2, um único controlador *Betrún* não comanda simultaneamente os dois braços *LH1500-C-6*; portanto, as operações de cada robô foram intercaladas. Para realizar as transições sem colisões, utilizaram-se movimentos de conexão entre operações, como ilustra a Figura 30.

Figura 30 – Sequência de movimentos entre operações

Fonte: Elaboração própria (2026)

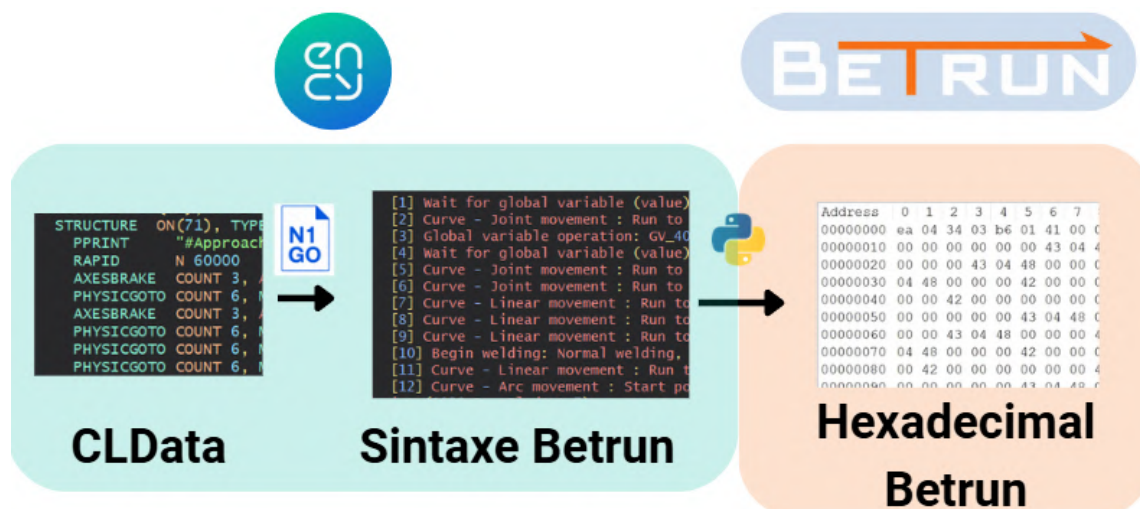
Cada comando da regra de abordagem é convertido em CLData durante a simulação. A interpolação para os ângulos de junta solicitados é realizada pela função *PhysicGOTO*, representada na figura pelo comando G53, ou pela função *MultiGOTO*.

5.3 Conjunto pós-processador e compilador

Desenvolveu-se um pós-processador capaz de converter o CLData gerado pela simulação no *ENCY* para a sintaxe de comandos utilizada pelo controlador *Be-trun*. Em seguida, o *script* compilador converte os arquivos textuais nos arquivos binários empregados pelo controlador, os quais podem ser inspecionados por meio de sua representação hexadecimal.

O fluxo de trabalho é apresentado no diagrama da Figura 31.

Figura 31 – Fluxo de pós-processamento



Fonte: Elaboração própria (2026)

Após o pós-processamento descrito na Seção 2.2.3, o *script* compilador executa as seguintes operações sobre os arquivos utilizados pelo controlador:

1. verifica se o nome do programa consta em `TeachRecord.dat`, que armazena a lista de programas, e o adiciona quando necessário;
2. verifica se as informações articulares de cada ponto constam em `Points.dat` e as adiciona ou atualiza quando necessário;
3. cria o arquivo de programa `.raw` com base em um modelo predefinido e realiza verificações de sintaxe;
4. verifica se o número de operações não excede o limite permitido por arquivo;
5. verifica se os programas referenciados nas chamadas de subrotina correspondem aos previstos;
6. verifica se as operações anteriores afetaram pontos referenciados por outros programas e, nesse caso, atualiza-os;
7. transfere os arquivos para o diretório do controlador.

Esse conjunto de operações integrou a simulação de WAAM no *ENCY* à célula de manufatura robotizada.

5.4 Fabricação de peças

Após as simulações no *ENCY*, os arquivos pós-processados e compilados foram transferidos para os controladores robóticos da célula para a fabricação das peças.

5.4.1 Sistema de resfriamento

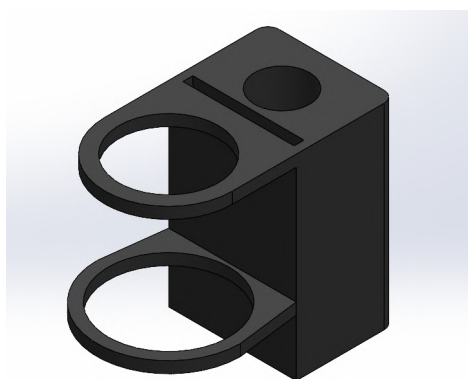
Confeccionou-se um sistema de resfriamento por ar comprimido para a célula robotizada, com base na patente do IFSC (TEICHMANN et al., 2019). O objetivo foi aproximar a geometria fabricada daquela definida no modelo. Para o acionamento, utilizou-se uma saída digital do controlador para acionar a válvula solenoide previamente instalada na célula por Kuner et al. (2025). O desenvolvimento concentrou-se no projeto de um suporte acoplável à tocha GMAW e na inclusão da lógica de acionamento no fluxo de trabalho do *ENCY*.

O suporte foi modelado no programa CAD *SolidWorks*, da empresa *Dassault Systèmes*, e posteriormente fabricado por impressão 3D em acrilonitrila butadieno estireno (ABS), em uma impressora *Creality K2 Plus*.

A geometria foi modificada iterativamente, com ajustes nas dimensões de furos e rasgos e a inclusão de elementos de fixação. A Figura 32a apresenta o modelo final, e a Figura 32b, o suporte impresso.

Figura 32 – Desenvolvimento de sistema de resfriamento por ar comprimido

(a) CAD do suporte



Fonte: Elaboração própria (2026)

(b) Suporte impresso



Fonte: Elaboração própria (2026)

Em seguida, foram inseridos na peça os elementos responsáveis por conduzir o fluxo de ar comprimido, além de um item adicional para servir como anteparo contra os respingos de solda do processo. Os itens foram:

- um engate rápido para mangueira de 6 mm de diâmetro externo, com rosca de 3/8 pol;

- um bico para soldagem a gás inerte com eletrodo de tungstênio (*Tungsten Inert Gas*, TIG), destinado a consumíveis de 2,4 mm. O orifício axial passante, também com 2,4 mm de diâmetro, foi utilizado como saída do ar de resfriamento, enquanto as saídas laterais do bico foram vedadas com PVC;
- uma chapa de aço carbono laminado a frio, com dimensões aproximadas de $20 \times 1,2 \times 100$ mm.

A montagem final desses elementos no suporte, assim como o encaixe deste na tocha GMAW do robô soldador, são apresentados nas Figuras 33a e 33b, respectivamente.

Figura 33 – Montagem do sistema de resfriamento

(a) Suporte com os componentes necessários



Fonte: Elaboração própria (2026)

(b) Sistema encaixado na tocha GMAW



Fonte: Elaboração própria (2026)

Quanto à implementação do resfriamento no fluxo de trabalho do *ENCY*, verificou-se que sua inclusão no ambiente simulado exigiria o desenvolvimento de operações personalizadas. A fim de simplificar a implementação e manter a fabricação das peças no prazo previsto, a sequência de resfriamento foi adicionada durante o pós-processamento da simulação.

Para executar as operações de resfriamento, utilizou-se a função do controlador *Betrún* que permite chamar subprogramas durante a execução do programa principal. Esse subprograma de resfriamento é composto pelas mesmas trajetórias de cada camada de deposição deslocadas em 20 mm em relação ao eixo X, para alinhar o bico de resfriamento com as trajetórias de deposição. Porém, em vez de executar o comando de soldagem, ativa-se a saída digital relacionada ao acionamento do sis-

tema de resfriamento. O pós-processador passou a incluir a opção de ativar o sistema de resfriamento e, quando selecionada, criar o subprograma necessário.

Durante a fabricação das peças, o sistema de resfriamento foi alimentado com ar comprimido à pressão de 8 bar.

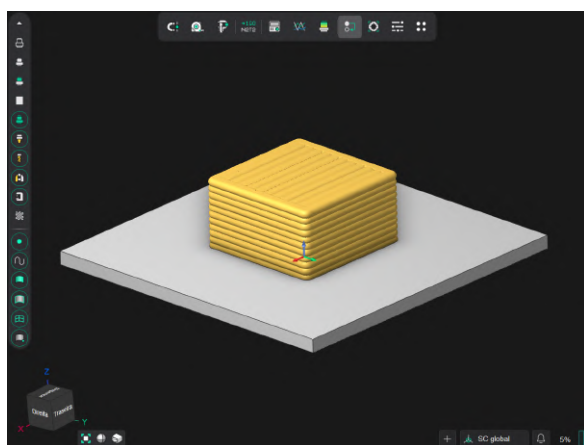
5.4.2 Fabricação de geometria conhecida

Para avaliar a geração de trajetórias, realizou-se um teste de fabricação com a geometria de paralelepípedo descrita por Teichmann et al. (2026). Mantiveram-se o espaçamento entre cordões, a alternância de 90° entre camadas e o resfriamento por ar comprimido após cada cordão de solda.

A peça obtida teve suas dimensões principais medidas com paquímetro digital *MTX*, com resolução de 0,01 mm. As aquisições abrangeram pelo menos dois pontos ou regiões de cada peça. Quando uma dimensão foi medida mais de uma vez, adotou-se a média aritmética simples das aquisições. Os registros das medições das peças helicoidais são apresentados no Apêndice D. As Figuras 34a e 34b apresentam, respectivamente, a simulação e a peça fabricada; a Tabela 13 apresenta as diferenças dimensionais.

Figura 34 – Paralelepípedo produzido por WAAM

(a) Simulação



(b) Peça fabricada



Fonte: Elaboração própria (2026)

Fonte: Elaboração própria (2026)

Tabela 13 – Medidas do bloco fabricado

Dimensão	Modelo CAD (mm)	Peça fabricada (mm)	Diferença (mm)
Largura	60,00	61,07	+1,07
Comprimento	60,00	60,80	+0,80
Altura	32,00	31,64	−0,36

5.4.3 Fabricação de geometria com reorientação do substrato

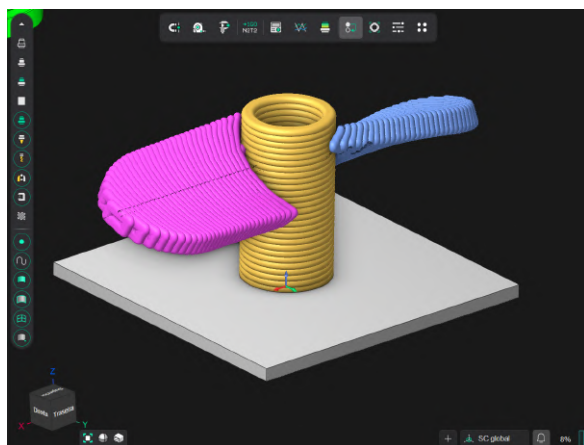
Após a fabricação da peça com o substrato em posição fixa, realizou-se um ensaio com uma geometria que exigia a reorientação do substrato pelo robô manipulador.

Nesse contexto, foi desenhada uma peça helicoidal, com duas lâminas espaçadas a 180° em relação a um tubo cilíndrico de base. A distância máxima entre as hélices é de 200 mm, e o cilindro possui diâmetro externo de 43 mm, diâmetro interno de 30 mm e altura de 90 mm. As demais medidas são apresentadas pela Tabela 14. Assim, a peça necessitou de duas reorientações por parte do robô manipulador, com o intuito de manter a ação da gravidade perpendicular aos cordões depositados, evitando o escorrimento das camadas.

A peça foi inicialmente fabricada com os mesmos parâmetros de soldagem do paralelepípedo da Figura 34b. Embora a fabricação completa tenha sido possível, notaram-se deformações significativas na geometria final, ocasionadas pelo escorrimento de material. A simulação da manufatura é apresentada pela Figura 35a, enquanto a Figura 35b apresenta a peça fabricada.

Figura 35 – Primeira hélice produzida por WAAM

(a) Simulação



Fonte: Elaboração própria (2026)

(b) Peça fabricada



Fonte: Elaboração própria (2026)

Adicionalmente, observou-se que a estratégia de deposição das hélices no *ENCY* exigia ajustes. Quando aplicada à peça completa, a operação de fatiamento não planar (*non-planar slicing*) gerava trajetórias que acompanhavam o contorno da geometria de referência. Em cada camada, esse comportamento produzia trajetórias aproximadamente retangulares, com dois cordões separados pela espessura da hélice, em vez de uma parede formada por um único cordão.

Esse comportamento da operação teve impacto direto sobre o resultado da peça fabricada, visto que cada camada das hélices foi construída utilizando dois

cordões de solda espaçados pela espessura do modelo de geometria (6,50 mm), em vez de uma parede de cordões únicos.

A Tabela 14 compara as dimensões do modelo 3D de referência com as da peça fabricada.

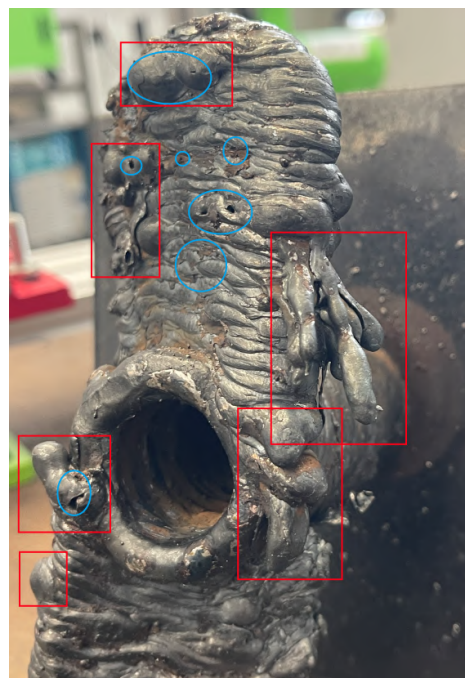
Tabela 14 – Medidas da primeira peça helicoidal fabricada

Dimensão	Modelo CAD (mm)	Peça fabricada (mm)	Diferença (mm)
Tubo cilíndrico			
Diâmetro externo	43,00	43,82	+0,82
Diâmetro interno	30,00	25,87	−4,13
Altura	90,00	89,70	−0,30
Hélice 1			
Largura do topo	55,25	67,22	+11,97
Largura da base	51,80	64,87	+13,07
Altura	78,50	63,81	−14,69
Espessura	6,50	17,49	+10,99
Hélice 2			
Largura do topo	55,25	63,96	+8,71
Largura da base	51,80	56,90	+5,10
Altura	78,50	77,34	−1,16
Espessura	6,50	17,02	+10,52

As hélices apresentaram espessuras próximas de três vezes os valores previstos. Também se observou sobrematerial nas larguras do topo e da base, associado à deposição de mais cordões do que o previsto e às deformações durante a fabricação. As Figuras 36a e 36b destacam as regiões com sobrematerial por quadrados vermelhos e as porosidades aparentes por círculos azuis.

Figura 36 – Defeitos superficiais na primeira peça**(a) Lado inferior**

Fonte: Elaboração própria (2026)

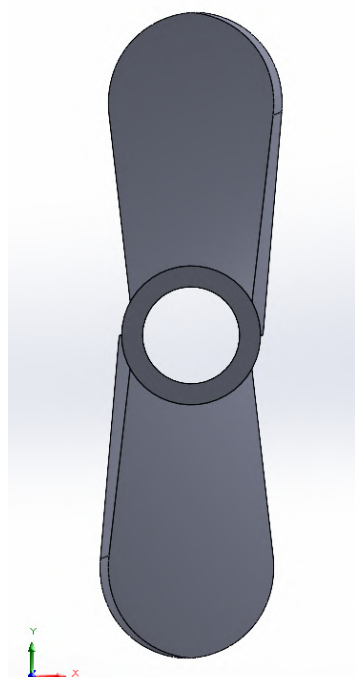
(b) Lado superior

Fonte: Elaboração própria (2026)

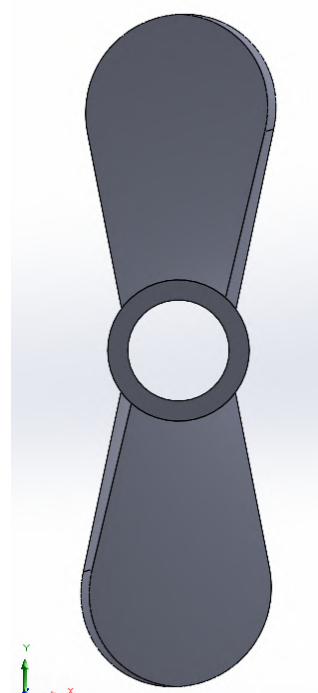
Com base nesses resultados, ajustaram-se a trajetória gerada pelo *ENCY* e os parâmetros de soldagem.

Quanto às trajetórias de deposição, definiu-se apenas a face superior de cada hélice como superfície de trabalho. Ao seguir o contorno dessa superfície, o planejador do *ENCY* passou a gerar o comportamento pretendido, com um único passe de soldagem por camada e, consequentemente, paredes de cordão único.

Além disso, a largura da base das hélices foi reduzida no modelo CAD devido ao material acumulado nessa região, conforme as Figuras 37a e 37b.

Figura 37 – Atualização do modelo CAD da peça helicoidal**(a) Vista superior antes do ajuste**

Fonte: Elaboração própria (2026)

(b) Vista superior depois do ajuste

Fonte: Elaboração própria (2026)

Com a alteração, buscou-se reduzir o acúmulo de material, principalmente nas camadas iniciais.

Para reduzir o aporte térmico, diminuiu-se a corrente de soldagem de 160 A para 120 A e aumentou-se a velocidade de soldagem de 0,48 m/min para 0,50 m/min, resultando no cordão da Figura 38. Esse cordão manteve praticamente a mesma relação R/L do parâmetro anterior, com valor de 0,51 em vez de 0,52 (medições disponíveis no Apêndice A).

Figura 38 – Cordão de solda com parâmetros modificados

Fonte: Elaboração própria (2026)

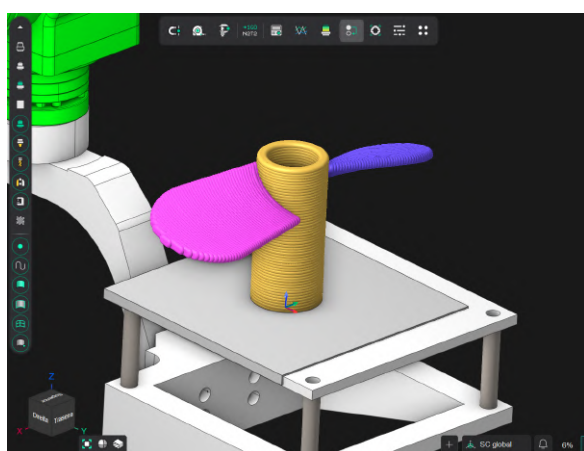
Essas alterações basearam-se nos parâmetros empregados por Teichmann e Mussi (2026) na fabricação de paredes por WAAM. Além disso, para diminuir a temperatura de interpasse, atualizou-se a lógica de resfriamento do pós-processador para

possibilitar um laço de repetição de passes de resfriamento. Assim, para a segunda iteração da peça, utilizaram-se dois passes de resfriamento, com velocidade de deslocamento igual à velocidade de soldagem, em vez do passe único usado na primeira peça. Por fim, para reduzir a porosidade aparente observada na primeira peça, o fluxo de gás de proteção foi aumentado de 15 L/min para 20 L/min.

Após as mudanças, fabricou-se a segunda iteração da peça helicoidal. As Figuras 39a e 39b apresentam, respectivamente, a simulação atualizada e o resultado da manufatura.

Figura 39 – Segunda hélice produzida por WAAM

(a) Simulação



Fonte: Elaboração própria (2026)

(b) Peça fabricada



Fonte: Elaboração própria (2026)

A Tabela 15 apresenta as diferenças dimensionais da segunda peça.

As mudanças nos parâmetros e nas estratégias produziram uma geometria mais próxima da desejada. Contudo, ainda se observou excesso de material nas paredes das hélices. A operação de fatiamento não planar não disponibilizava uma opção para alternar o sentido de deposição entre as camadas. Em contraste, a operação de Adição 3D permitia definir um ângulo de alternância entre camadas. A operação de revestimento em cinco eixos (*Cladding 5D*) também foi brevemente avaliada como alternativa, por disponibilizar um conjunto mais amplo de parâmetros, mas não foi possível concluir sua configuração no período do trabalho. Por esse motivo, manteve-se o fatiamento não planar sem alternância do sentido de deposição, o que pode ter contribuído para o excesso de material observado em um dos lados de cada hélice, considerando a recomendação de Verlinde et al. (2021).

A comparação visual da superfície das peças indica menor ocorrência de defeitos aparentes na segunda peça, conforme a Figura 40. Deve-se ressaltar, porém, que essa observação se restringe à inspeção visual externa e não constitui uma classificação formal da qualidade das peças. Conforme o procedimento descrito por

Tabela 15 – Medidas da segunda peça helicoidal fabricada

Dimensão	Modelo CAD (mm)	Peça fabricada (mm)	Diferença (mm)
Tubo cilíndrico			
Diâmetro externo	42,00	40,74	−1,26
Diâmetro interno	30,00	28,66	−1,34
Altura	90,00	92,045	+2,045
Hélice 1			
Largura do topo	56,30	62,62	+6,32
Largura da base	39,00	49,95	+10,95
Altura	79,00	66,76	−12,24
Espessura	6,00	7,45	+1,45
Hélice 2			
Largura do topo	56,30	60,80	+4,50
Largura da base	39,00	43,58	+4,58
Altura	79,00	76,64	−2,36
Espessura	6,00	8,4	+2,4

Teichmann et al. (2026) com base na AWS D20.1/D20.1M, essa classificação exige o corte das peças e a análise macrográfica das seções, incluindo a medição das dimensões e da distribuição de inclusões e porosidades. Essas etapas não foram realizadas devido ao escopo definido para o trabalho.

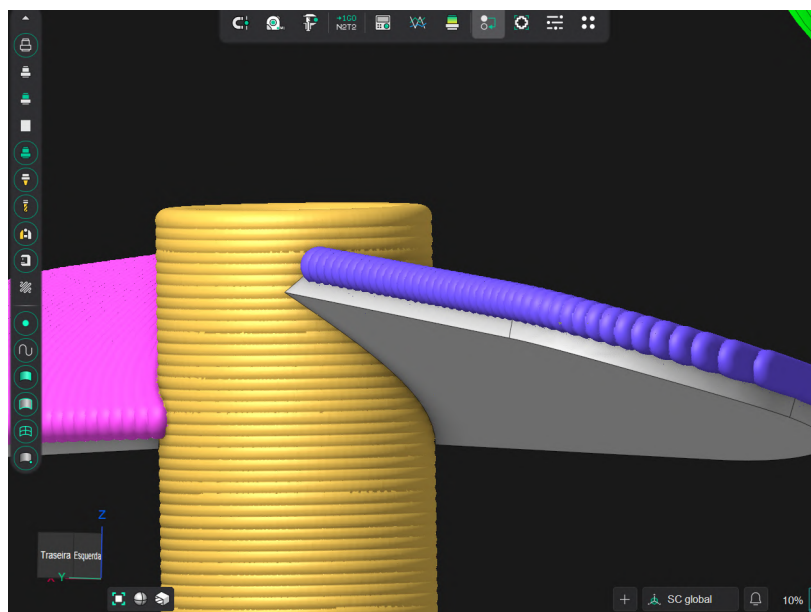
Figura 40 – Vista de topo das duas hélices produzidas

Fonte: Elaboração própria (2026)

Na segunda peça, a base das hélices coincidiu com o topo do cilindro, enquanto o modelo de referência previa uma distância de aproximadamente 6,50 mm. Parte dessa diferença decorreu do planejamento das trajetórias de deposição. Na Fi-

gura 41, o modelo de referência é apresentado em cinza, e as faces coloridas representam as deposições geradas pelas operações aditivas.

Figura 41 – Discrepância do posicionamento das hélices



Fonte: Elaboração própria (2026)

Essa discrepância decorreu, em parte, da estratégia adotada para obter paredes de cordão único. Ao definir apenas a face superior das hélices como superfície de trabalho, o planejador seguiu o contorno dessa face e deixou de gerar as trajetórias aproximadamente retangulares obtidas quando a peça completa era selecionada. Entretanto, essa escolha também alterou o posicionamento da hélice no cilindro de base, deslocando-a verticalmente.

Os resultados evidenciaram limitações no posicionamento relativo dos robôs e no planejamento das trajetórias. Embora a célula virtual tenha permitido executar a fabricação, as diferenças observadas nas hélices mostram que a correspondência entre os ambientes digital e físico ainda requer ajustes.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho integrou o *ENCY* à célula robotizada por meio de um pós-processador personalizado e de um compilador de programas, responsáveis por converter as trajetórias geradas no ambiente CAM para os arquivos utilizados pelo controlador *Betrun*. Os modelos cinemáticos dos braços robóticos também foram ajustados aos pontos de referência obtidos dos controladores. Nesse conjunto de pontos, os resíduos máximos foram de 0,034 mm para o robô soldador e inferiores a 0,001 mm para o robô manipulador.

As peças fabricadas demonstraram a execução do fluxo de trabalho baseado em CAM e permitiram avaliar a manufatura com reorientação do substrato. Com isso, estabeleceu-se uma plataforma experimental para pesquisas futuras sobre manufatura aditiva metálica com dois manipuladores robóticos.

Os resultados obtidos contemplaram os objetivos definidos para o trabalho, desde a configuração do ambiente de simulação até a fabricação e a análise das peças de teste.

6.1 Limitações

A integração realizada depende do conhecimento do operador para configurar as operações no *ENCY* e adaptar o pós-processador e o compilador quando forem incluídas novas operações. Além disso, os parâmetros disponibilizados pelo programa CAM limitam as estratégias de deposição que podem ser implementadas. A ampliação das opções de configuração do *ENCY* poderá reduzir essas restrições.

O formato do suporte de substrato do robô manipulador também restringiu o posicionamento e dificultou a definição das posições de soldagem. Um suporte que mantivesse o substrato coaxial ao flange do robô tornaria as reorientações mais simples.

Embora o ajuste do modelo cinemático do robô soldador tenha apresentado resíduo máximo de 0,034 mm nos pontos utilizados, o posicionamento relativo dos robôs permaneceu como a principal fonte de discrepância entre os ambientes digital e físico. Por isso, recomendam-se experimentos adicionais para avaliar e reduzir essa diferença.

6.2 Sugestões para trabalhos futuros

A integração do programa CAM *ENCY* à célula robotizada permite diferentes frentes de continuidade. As principais sugestões de aprimoramento são apresentadas a seguir.

- Sistema de segurança: conectar a saída associada às paradas de emergência de cada controlador com a entrada de emergência do outro, possibilitando, assim, que qualquer parada de emergência em um dos controladores desencadeie uma parada também no outro. Além disso, seria possível utilizar o Controlador Lógico Programável (CLP) associado ao controlador *Betrun* para implementar um sistema de intertravamento durante a operação, por exemplo, com sensores de barreira na célula;
- Sistema supervisorio: ampliar a interface gráfica utilizada para intercalar os movimentos dos robôs, incorporando a leitura das variáveis globais referentes à configuração dos braços e o controle das saídas digitais;
- Operação personalizada no *ENCY*: modificar o arquivo `.xml` que define a interface das operações aditivas para inserir parâmetros de soldagem, como tensão, corrente e uso de tecimento, diretamente no *ENCY*. Esses parâmetros poderiam, então, ser organizados no programa pelo pós-processador, enquanto o compilador atualizaria as informações relevantes nos arquivos `WeldRecord.dat` e `WaveRecord.dat`;
- Simulação computacional: incorporar ao fluxo de trabalho uma etapa de engenharia auxiliada por computador (*Computer-Aided Engineering*, CAE), destinada a análises estruturais e térmicas, para auxiliar a parametrização dos cordões e a otimização das estratégias de deposição e, assim, reduzir o número de iterações de fabricação;
- Sistema de troca automática de ferramenta: desenvolver uma solução análoga à apresentada por José (2022) para realizar a troca automática de ferramentas. Essa solução permitiria alternar as funções de soldagem e manipulação e empregar diferentes ferramentas de deposição;
- Atualização dos suportes de ferramenta: modificar o suporte utilizado na manipulação do substrato para facilitar o acesso às diferentes superfícies da peça. O suporte da ferramenta a laser também pode ser modificado para reduzir as limitações de movimento impostas pela fibra óptica e viabilizar operações de WLAM;
- Transferência dos dados de pontos: avaliar o uso de coordenadas cartesianas relativas ao sistema de coordenadas de trabalho (*user frame*), em vez de valores articulares absolutos, para representar as trajetórias. A criação automática desses sistemas por meio de um *script* pode reduzir o erro residual de posicionamento nas operações.

REFERÊNCIAS

- CAMPOCASSO, S. et al. A framework for future cam software dedicated to additive manufacturing by multi-axis deposition. *In: Procedia CIRP, 6th CIRP Global Web Conference*. [S.l.]: Elsevier, 2018. v. 78, p. 79–84. 14, 20, 21
- CHAN, S.; KWAN, R. Post-processing methodologies for off-line robot programming within computer integrated manufacture. *Journal of Materials Processing Technology*, Elsevier, v. 139, n. 8-14, 2003. 20
- DING, D. et al. Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Springer, v. 81, n. 1-4, p. 465–481, 2015. 14, 17, 18, 19
- ENCY. *Postprocessor Generator User manual ENCY 1*. 2026. Disponível em: <<https://docs.encycam.com/lnp/2/en/10088.html>>. Acesso em: 2 mai. 2026. 37
- GONZÁLEZ, H. et al. Cam development for additive manufacturing in turbo-machinery components. *In: Manufacturing Engineering Society International Conference (MESIC)*. Vigo, Spain: Elsevier, 2017. v. 13, p. 802–809. 19, 21
- HEDRICK, R. W.; URBANIC, R. J.; BURFORD, C. G. Development considerations for an additive manufacturing cam system. *In: IFAC-PapersOnLine, 15th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing*. [S.l.]: Elsevier, 2015. v. 48, n. 3, p. 2327–2332. 14
- HUNAN Betrun Robot Co., Ltd. *Operation Manual*. Changsha, Hunan, China, 2022. 191 p. Manual fornecido diretamente pelo fabricante; não publicado online. 29
- JOSÉ, L. *Flexibilização de robô industrial de soldagem via o desenvolvimento de acoplador de ferramentas*. Florianópolis, SC, Brasil: [s.n.], 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecatrônica). 69
- KUNER, E. C. et al. *Desenvolvimento e Integração de Célula Robotizada Colaborativa para Manufatura Aditiva a Laser (LMD/WLAM)*. [S.l.]: Instituto Federal de Santa Catarina, 2025. Relatório interno - Não publicado. 15, 29, 30, 58
- LAMBIASE, F. et al. A state of the art review of wire arc additive manufacturing (waam) – part 1:: process fundamentals, parameters and materials. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Springer, v. 138, n. 4965–4993, 2025. 17
- LAMBIASE, F. et al. A state of the art review of wire arc additive manufacturing (waam) - part 2: process improvements and industrial applications. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Springer, v. 143, n. 4623–4654, 2026. 24, 25
- LATIF, K. et al. A review of G code, STEP, STEP-NC, and open architecture control technologies based embedded CNC systems. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Springer, 2021. Publicado em 17 abr. 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00170-021-06741-z>>. 20
- LBBBD Robots. *Our products - LH1500-C-6*. 2024. Disponível em: <<https://www.lbbbd-robots.com/products/lh1500-c-6>>. Acesso em: 22 sep. 2025. 29, 31, 32, 41, 49

MX3D. *Framatome Impeller: Advancing nuclear manufacturing through wire arc additive manufacturing (waam)*. 2026. Disponível em: <<https://mx3d.com/case/framatome-impeller/>>. Acesso em: 16 jun. 2026. 26

MX3D. *M-Metal AM Systems*. 2026. Disponível em: <<https://mx3d.com/waam-systems/>>. Acesso em: 19 jun. 2026. 26

NAGATA, F. et al. Post processor for industrial robots: Circular arc interpolation of cls data to generate fanuc robotic program. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*. Takamatsu, Japan: IEEE, 2017. p. 520–524. Accessed via IEEE Xplore. Authorized use limited to Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC). 22

SANTOS, V. M. F. *Robótica Industrial: Apontamentos teóricos, Exercícios para aulas práticas, Problemas de exame resolvidos*. Aveiro, Portugal: [s.n.], 2004. Material didático interno. 23, 24

SprutCAM Tech Ltd. *.NET postprocessing*. 2021. Curso gratuito, com duração indicada de 2 horas. Disponível em: <<https://sprutcam.com/pt-br/courses/net-postprocessing/>>. Acesso em: 4 mai. 2026. 37

TEICHMANN, E. W. et al. *Sistema de resfriamento para manufatura aditiva*. 2019. Patente brasileira BR n. 10 2019 005705 0. Titular: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina. Depósito no INPI em 22 mar. 2019. 58

TEICHMANN, E. W.; MUSSI, M. *WAAM/WLAM: Manufatura aditiva com arco elétrico e laser utilizando sistema de resfriamento por ar comprimido: Relatório técnico: parceria powermig-ifsc*. Florianópolis, SC, Brasil, 2026. 25 p. Relatório interno do Projeto PowerWAAM. 44, 64

TEICHMANN, E. W. et al. Contributions of compressed air in the heat control and cleanness in wire arc additive manufacturing waam (ded-arc). *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Springer, 2026. Publicado em 26 mar. 2026. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00170-026-17939-4>>. 14, 18, 19, 20, 42, 43, 44, 45, 60, 66

VALENTIN, M.; ARNAUD, C.; KLING, R. Additive manufacturing by wire based laser metal deposition. In: *Lasers in Manufacturing Conference*. Munich, Germany: Elsevier, 2019. 14

VERLINDE, W. et al. *Practical guideline – 3D printing with Gas Metal Arc Welding (WAAM): get your welding robot started with 3D printing*. Ghent, 2021. 87 p. Acesso em: 5 dez. 2025. Disponível em: <<https://www.bil-ibs.be>>. 18, 19, 20, 21, 22, 23, 44, 46, 47, 65

XIONG, J. et al. Determination of surface roughness in wire and arc additive manufacturing based on laser vision sensing. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, Springer, v. 31, n. 74, 2018. 17

APÊNDICES

APÊNDICE A – CORDÕES DE SOLDA

Figura 42 – Medições de geometria de cordões de solda

Medidas cordões						
Cordão 160A, 0,48m/min						
Largura				Reforço		
Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)		Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)
6,4	7,06	6,78		3,32	3,88	3,33
Médias	6,75			3,51		
R/L	0,52					
Cordão 120A, 0,50m/min						
Largura				Reforço		
Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)		Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)
5,26	5,17	5,34		2,63	2,38	3,08
Médias	5,26			2,70		
R/L	0,51					

Fonte: Elaboração própria (2026)

Figura 43 – Configuração de soldagem no controlador *Betrun 1/2*

NewManageToolPLCConfigureSystemNormal welding

WelderTimeIO portBasic par...Calibrate

Feeding speed(m/min)

No-load:120

Arcing:200

Stay:120

Welding:120

Arc extinction:120

Anti-sticking:80

Welding voltage(V)

No-load:16.4

Arcing:21

Stay:16.4

Welding:19

Arc extinction:16.4

Anti-sticking:24.8

...m arc striking times:6

Backward distance:0

Enabe Backward function☒

Arc striking stay time:1

Welding process name:std_waamSave

TCS : TF2202026-06-24 02:37:31

Fonte: Elaboração própria (2026)

Figura 44 – Configuração de soldagem no controlador *Betrun 2/2*

NewManageToolPLCConfigureSystemNormal welding

WelderTimeIO portBasic para...Calibrate

...nced time of supplying gas:100

No-load time:100

Arc striking time:100

Arc extinction time:500

Lagged time of stopping gas:100

Anti-sticking time:500

Welding process name:std_waamSave

TCS : TF2202026-06-24 02:50:51

Fonte: Elaboração própria (2026)

APÊNDICE B – COMANDOS DO CONTROLADOR *Betrún* EM ARQUIVOS .RAW

Tabela 16 – Comandos do controlador *Betrún* nos arquivos .raw

Byte	Comando
Comandos (0x0000..0x0090)	
0x00	comando de movimento (<i>Joint</i> , <i>Linear</i> ou <i>Arc</i>)
0x01	comando de saída digital
0x04	operação de variável global
0x0C	iniciar tecimento
0x0D	finalizar tecimento
0x27	iniciar seção de <i>offset</i>
0x28	finalizar seção de <i>offset</i>
0x40	<i>delay</i>
0x41	esperar por variável global
0x42	iniciar soldagem
0x43	finalizar soldagem
0x48	chamar subrotina
0x80	iniciar lógica <i>IF</i>
0x83	finalizar lógica <i>IF</i>
0x84	iniciar lógica <i>WHILE</i>
0x87	finalizar lógica <i>WHILE</i>
0x89	lógica <i>JUMP</i>
0x8A	definição de <i>LABEL</i>

APÊNDICE C – PONTOS EXPORTADOS PARA TESTES

Figura 45 – Pontos de teste do robô soldador

Robô Soldador - "Xing"														
Point_Nr	X	Y	Z	A	B	C	J1	J2	J3	J4	J5	J6	Notes	
1	820,87	-0,838	737,37	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Home	
2	953,18	15,35	655,22	-0,845	-36,85	-1,534	0,973	11,876	-5,807	-1,72	-42,9	-2,977	ShortSemAuto6	
3	1087,8	-195,7	569,4	0,9805	2,786	35,788	-10,16	27,481	-18,6	0,4755	-5,968	46,029	3rm31	
4	920,94	22,409	658,44	-0,522	-36,85	-0,949	1,446	8,624	-2,327	-1,76	-43,12	-2,997	ShortBloAuto76	
5	930	61,321	750,19	18,126	-13,57	18,706	3,824	11,683	-13,88	17,049	-12,63	14,282	snctAuto0	
6	856,88	-172,8	589,12	-37,81	10,585	-18,75	-11,35	3,4326	9,2876	-39,12	-6,372	-17,79	a2	
7	545,06	1,3623	487,84	0,0012	-50,07	1,0153	0,2313	-30,43	45,061	-0,413	-64,7	0,4922	4q	
8	435,96	-378,7	961,59	-5,419	-26,27	-10,09	-40,9	-13,16	-9,573	13,047	-0,835	29,533	testAuto3	
9	1223,6	607,32	257,32	-1E-04	0,0046	0,0135	26,432	65,066	-52,61	0,002	-12,45	-26,42	f4	
10	1130,9	-238,6	629,98	4E-05	0,0079	47,457	-11,87	35,176	-35,06	-0,002	-0,108	59,328	START-B1	
11	767,8	11,26	344,72	1,279	-1,109	51,043	0,9028	-2,84	36,94	1,5437	-35,22	51,006	LASEAuto0	
12	715,13	288,71	294,15	-2,8	-2,421	-46	22,047	-0,367	39,233	-4,572	-39,97	-70,89	CutStart	
13	361,24	316,59	913,23	0,6797	-33,01	45,076	41,331	-24,23	2,8014	-20,7	-4,626	6,6806	snctAuto2	
14	581,95	-0,843	893,13	0,0008	-135,2	0,0006	-5E-04	-16,67	0,0047	0,0004	-118,5	0,0001	petry	
15	152,56	-463,8	896,48	-89,76	-6,418	-60,49	-71,69	-24,52	4,6974	-31,54	-66,8	0,0013	p2	
16	442,44	-0,839	1192,5	67,431	-26,54	47,07	-6E-05	0,0002	-52,46	55,703	3E-05	0,0001	f	
17	835,27	454,54	368,39	-30,1	14,732	17,464	28,605	14,008	16,456	-17,71	-1,815	-20,24	g	
18	431,22	270,06	740,98	-34,16	-94,66	-131,9	32,152	-29,67	22,525	94,806	-119,6	0,0005	b3	
19	1131,6	119,04	581,61	1,2226	-3,913	-45,45	6,0475	31,565	-25,49	0,8136	-10,1	-51,43	APXIMP	
20	611,47	547,67	737,35	-8E-04	0,0011	41,908	41,908	-1E-05	-0,002	0,0001	-1E-04	6E-06	KinCheck1	
21	-485,8	-661,7	737,32	0,0032	-0,002	-126,2	-126,2	0,0002	0,0041	8E-05	-2E-04	-0,001	KinCheck1n	
22	1073,3	-0,841	-389	0,0005	71,853	-0,002	-2E-04	71,852	0,0017	1E-05	-3E-04	-0,001	KinCheck2	
23	8,851	-0,838	970,41	-2E-04	-50,86	-0,002	-2E-04	-50,86	0,0013	2E-05	-2E-04	-0,001	KinCheck2n	
24	663,81	-0,84	128,83	0,0003	55,974	-0,002	-2E-04	4E-05	55,974	1E-05	-2E-04	-0,001	KinCheck3	
25	501,35	-0,84	1162,6	-2E-04	-46,81	-0,002	-2E-04	5E-06	-46,81	9E-06	-1E-04	-0,001	KinCheck3n	
26	820,88	-0,84	737,35	154,98	-0,002	-0,002	-2E-04	2E-05	0,0013	154,98	-2E-04	-0,002	KinCheck4	
27	820,87	-0,84	737,35	-106,6	-4E-04	0,0005	-2E-04	2E-05	0,0011	-106,6	-2E-04	-7E-04	KinCheck4n	
28	820,88	-0,841	737,34	-4E-04	15,958	-0,002	-2E-04	2E-05	0,0021	-5E-04	15,956	-0,001	KinCheck5	
29	820,87	-0,84	737,35	-2E-04	-116,4	-0,001	-2E-04	2E-05	0,0012	-5E-04	-116,4	-0,001	KinCheck5n	
30	820,88	-0,84	737,35	-7E-04	0,0013	87,513	-2E-04	2E-05	0,0013	-7E-04	-5E-05	87,513	KinCheck6	
31	820,88	-0,84	737,35	-4E-04	0,001	-150,9	-2E-04	2E-05	0,0012	-4E-04	-2E-04	-150,9	KinCheck6n	

Fonte: Elaboração própria (2026)

Figura 46 – Pontos de teste do robô manipulador

Robô Manipulador - "Ling"														
Point_Nr	X	Y	Z	A	B	C	J1	J2	J3	J4	J5	J6	Notes	
1	820,24	-0,434	736,73	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0 Home	
2	962,29	-96,23	374,99	6,7788	-1,63	-9,512	-5,685	15,428	14,067	7,9968	-30,21	0,0618	m	
3	1231,5	-53,3	381,17	0,4693	-1,752	36,418	-2,458	42,912	-25,66	0,575	-18,98	39,048	ShortBloAuto0	
4	843,1	-43,76	375,03	6,7791	-1,632	-9,517	-2,942	3,7177	27,537	8,1126	-32,29	-2,395	OFC2Auto0	
5	1296,8	-138	304,01	39,632	23,865	28,412	-6,055	53,478	-36,45	33,586	13,726	44,21	ChapaIncl45	
6	1318,7	-106,9	455,76	0,4698	-1,75	62,474	-4,615	60,74	-62,15	0,6088	-0,293	67,076	chapAuto11	
7	1166	32,49	442,86	-31,22	-22,48	29,491	1,6175	34,468	-17,92	-36,88	-35,34	17,41	chapAuto8	
8	981,19	-368,9	720,77	-0,387	-2,033	-35,97	-20,58	24,112	-27,19	0,3525	1,0375	-15,39	TESTE	
9	545,01	172,04	951,48	-74,69	-61,17	-83,6	17,562	-14,24	-7,759	-61,87	-36,62	-62,61	J4	
10	75,194	-51,74	1244,7	-176	-12,84	-78,65	-34,26	-8,069	-68,15	103,08	-85,94	170,2	Joas2III	
11	709,51	-367,1	833,07	-6,11	-9,392	-35,99	-27,32	0,9406	-9,614	-1,054	-2,466	-8,111	Joas2	
12	874,62	119,72	121,8	21,54	-135	10,197	7,8224	19,749	33,102	-159,1	7,0007	-182,4	davi7	
13	572,92	-179,2	332,65	-46,52	-65,01	-63,17	-17,33	-20,57	52,417	-175	-75	-189,4	davi	
14	426,65	-394,7	1096,3	-4,776	-37,29	-31,21	-42,73	-1,488	-35,41	21,327	4,8263	5,1471	SNCT-14Auto2	
15	691,34	-525,3	836,9	45,165	-137,4	15,436	-37,2	8,2136	-17,79	1,1183	-111,7	-39,36	OF5Auto4	
16	448,66	-174,2	879,71	40,865	-140,4	7,8564	-21,17	-25,93	7,1393	38,524	-112,7	0,746	OFC3Auto5	
17	275,74	-82,59	1220,4	50,982	-178,2	28,597	-16,59	-6,61	-53,84	-97,09	-42,18	-98,99	PETR-TCHALAuto0	
18	275,74	-82,59	1220,4	-158,5	-22,1	-53,23	-16,59	-6,61	-53,84	-97,09	-77,3	5,5142	PETRY1	
19	180,04	-199,6	873,98	-29,01	-10,09	-43,27	-47,85	-43,05	14,34	-10,98	-4E-04	10,023	A1Auto1	
20	-374,4	729,79	736,73	-5E-04	0,0006	117,19	117,19	0,0002	0,0001	0,0007	-1E-04	-0,003	phAuto1	
21	-131,6	-809,6	736,72	6E-05	-1E-03	-99,21	-99,21	0,0003	0,0001	0,0009	-2E-04	-0,002	phAuto2	
22	1137,2	-0,432	171,87	0,0009	38,46	-0,002	0,0001	38,46	0,0001	0,0008	-3E-04	-0,001	phAuto4	
23	-72,27	-0,434	953,2	0,0015	-55,68	0,0003	9E-05	-55,68	-5E-05	0,0008	-2E-04	-1E-03	phAuto5	
24	722,78	-0,433	204,49	0,0011	47,664	-0,002	0,0001	0,0001	47,664	0,0008	-3E-04	-1E-03	phAuto7	
25	311,47	-0,434	1235,2	0,002	-64,26	0,0009	0,0001	0,0001	-64,26	0,0008	-2E-04	-1E-03	phAuto8	
26	820,25	-0,432	736,71	130,39	-0,001	-0,002	0,0001	0,0005	0,0012	130,39	-4E-04	-9E-04	phAuto10	
27	820,25	-0,433	736,71	-118	-0,001	0,0005	0,0001	0,0005	0,0012	-118	-4E-04	-9E-04	phAuto11	
28	820,25	-0,432	736,71	0,0015	9,7006	-7E-04	0,0002	0,0003	0,0013	0,0015	9,6991	-9E-04	phAuto13	
29	820,25	-0,432	736,71	0,0015	166,36	-0,001	0,0001	0,0004	0,0012	0,0014	-193,6	-9E-04	phAuto14	
30	820,25	-0,433	736,71	0,0016	0,0019	-8,365	0,0001	0,0004	0,0012	0,0016	0,0003	351,64	phAuto16	
31	820,25	-0,433	736,71	0,0013	0,0019	38,126	9E-05	0,0006	0,0012	0,0013	7E-05	-321,9	phAuto17	

Fonte: Elaboração própria (2026)

Figura 47 – Primeira verificação para robô soldador

Nr	Point name	J1 error	J2 error	J3 error	J4 error	J5 error	J6 error	X error	Y error	Z error	Max joint error	Max cartesian error
1	Home	-0,058508	0,001009	0,319162	0,000000	-0,320171	0,058508	-0,871460	0,838237	3,634644	0,320171	3,634644
2	ShortSemAuto6	-0,050380	-0,041030	0,365015	0,032308	-0,325329	0,055329	-0,081843	0,836968	3,663448	0,365015	3,663448
3	3rm31	-0,043453	-0,141476	0,485920	-0,001917	-0,344077	0,046025	1,104144	0,653797	3,341521	0,485920	3,341521
4	ShortBloAuto76	-0,052135	-0,015915	0,338399	0,033662	-0,323911	0,057652	-0,320971	0,830403	3,709658	0,338399	3,709658
5	snctAuto0	-0,051531	-0,101774	0,432473	0,035004	-0,301021	0,150000	-0,070601	0,835386	3,507832	0,432473	3,507832
6	a2	-0,054943	0,065401	0,263545	-0,031220	-0,288955	-0,167150	-0,528319	0,960975	3,877887	0,288955	3,877887
7	4q	-0,088114	0,360473	0,086149	0,153815	-0,447115	0,194757	-3,058724	0,825895	3,354867	0,447115	3,354867
8	testAuto3	-0,083164	-0,064904	0,382497	0,034443	-0,292015	0,146613	-0,612240	1,639265	3,146085	0,382497	3,146085
9	f4	-0,035158	-0,662966	1,315380	0,000002	-0,652413	0,035181	2,128813	1,994310	1,489523	1,315380	2,128813
10	START-B1	-0,041552	-0,312220	0,726977	-0,000006	-0,414758	0,041542	1,648405	0,510039	2,882152	0,726977	2,882152
11	LASEAuto0	-0,062545	0,280775	0,127941	0,009339	-0,407170	0,076931	-1,182241	0,819712	4,322328	0,407170	4,322328
12	CutStart	-0,062276	0,303095	0,118451	-0,027023	-0,424062	0,018960	-1,214265	0,412619	4,424348	0,424062	4,424348
13	snctAuto2	-0,099986	0,023885	0,290114	0,034281	-0,326670	-0,023824	-2,288595	-0,896514	2,909408	0,326670	2,909408
14	petry	-0,082529	0,003319	0,311525	-0,120656	-0,314924	-0,164247	-1,868906	0,838254	3,171119	0,314924	3,171119
15	p2	-0,098375	0,036787	0,278563	-0,170228	-0,317097	-0,220949	0,056585	2,497522	2,924304	0,317097	2,924304
16	f	-0,108552	-0,629817	1,239935	0,087073	-0,288347	0,541792	-0,053604	0,838237	2,970354	1,239935	2,970354
17	g	-0,050506	0,116975	0,227394	-0,027936	-0,341255	-0,063470	-0,378595	0,748333	4,129519	0,341255	4,129519
18	b3	-0,094392	0,161879	0,183774	-0,584212	0,120607	-0,684488	-2,856299	-0,805295	2,961888	0,684488	2,961888
19	APXIMP	-0,042209	-0,204601	0,570167	0,003950	-0,364931	0,047927	1,149803	0,964744	3,140671	0,570167	3,140671
20	KinCheck1	-0,058508	0,001026	0,322217	-0,000001	-0,320167	0,058507	-1,214730	0,036125	3,669510	0,322217	3,669510
21	KinCheck1n	-0,058506	0,001040	0,319133	-0,000004	-0,320172	0,058508	1,191240	0,207566	3,634719	0,320172	3,634719
22	KinCheck2	-0,044749	0,010659	0,327177	-0,042524	-0,337842	0,013687	3,328028	0,838228	2,161270	0,337842	3,328028
23	KinCheck2n	-5,410073	0,014128	0,294300	4,193624	-0,182644	3,434443	-3,291163	0,838248	1,454165	5,410073	3,291163
24	KinCheck3	-0,072351	0,507286	0,044697	-0,059966	-0,552004	0,039907	-0,807119	0,838240	4,751492	0,552004	4,751492
25	KinCheck3n	-0,095796	-0,490171	1,001844	0,069842	-0,511632	0,066195	-0,166765	0,838238	3,002102	1,001844	3,002102
26	KinCheck4	-0,058508	0,001019	0,319150	-0,000390	0,314876	0,082369	-0,871465	0,838240	3,634636	0,319150	3,634636
27	KinCheck4n	-0,058508	0,001020	0,319148	-0,000067	0,035282	-0,323552	-0,871486	0,838240	3,634626	0,323552	3,634626
28	KinCheck5	-0,058507	0,001029	0,319138	-0,016703	-0,320177	0,060751	-0,871518	0,838241	3,634634	0,320177	3,634634
29	KinCheck5n	-0,058508	0,001017	0,319154	-0,116695	-0,320230	-0,130245	-0,871452	0,838240	3,634652	0,320230	3,634652
30	KinCheck6	-0,058508	0,001023	0,319149	-0,000002	-0,320172	0,058507	-0,871511	0,838240	3,634667	0,320172	3,634667
31	KinCheck6n	-0,058508	0,001022	0,319149	-0,000002	-0,320173	0,058509	-0,871510	0,838240	3,634665	0,320173	3,634665
MÉDIA		0,632138									3,473733	
DESVIO PADRÃO		0,910303875									0,511200761	
MÁXIMO		5,410073									4,751492	

Fonte: Elaboração própria (2026)

Figura 48 – Segunda verificação para robô soldador

Nr	Point name	J1 error	J2 error	J3 error	J4 error	J5 error	J6 error	X error	Y error	Z error	Max joint error	Max cartesian error
1	Home	0,000000	-0,000005	-0,000097	0,000000	0,000102	0,000000	0,000330	0,000001	-0,001156	0,000102	0,001156
2	ShortSemAuto6	0,000000	0,000005	-0,000107	0,000003	0,000104	0,000004	0,000110	0,000003	-0,001178	0,000107	0,001178
3	3rm31	0,000000	0,000017	-0,000123	0,000000	0,000105	-0,000002	-0,000055	0,000008	-0,001147	0,000123	0,001147
4	ShortBloAuto76	0,000000	0,000002	-0,000106	0,000003	0,000103	0,000004	0,000130	0,000005	-0,001203	0,000106	0,001203
5	snctAuto0	0,000000	0,000010	-0,000115	-0,000007	0,000101	-0,000032	0,000235	0,000014	-0,001167	0,000115	0,001167
6	a2	0,000000	-0,000016	-0,000084	0,000007	0,000077	0,000172	-0,000027	-0,001178	0,000084	0,001178	0,001178
7	4q	0,000000	-0,000059	-0,000060	0,000003	0,000120	0,000002	0,000488	0,000003	-0,001086	0,000120	0,001086
8	testAuto3	0,000001	0,000014	-0,000131	-0,000001	0,000114	-0,000027	0,000498	-0,000443	-0,001135	0,000131	0,001135
9	f4	0,000001	0,000080	-0,000213	0,000000	0,000133	-0,000001	-0,000271	-0,000155	-0,000823	0,000213	0,000823
10	START-B1	0,000000	0,000044	-0,000159	0,000000	0,000115	0,000000	-0,000055	0,000009	-0,001048	0,000159	0,001048
11	LASEAuto0	0,000000	-0,000043	-0,000059	-0,000002	0,000102	-0,000003	0,000012	0,000002	-0,001093	0,000102	0,001093
12	CutStart	-0,000001	-0,000047	-0,000056	0,000007	0,000102	0,000011	-0,000041	-0,000008	-0,001080	0,000102	0,001080
13	snctAuto2	0,000001	-0,000002	-0,000112	0,000003	0,000107	0,000040	0,000590	0,000503	-0,001080	0,000112	0,001080
14	petry	0,000000	0,000001	-0,000111	-0,000001	0,000112	-0,000001	0,000630	0,000002	-0,001111	0,000112	0,001111
15	p2	0,000000	-0,000003	-0,000111	0,000143	0,000099	0,000156	0,000242	-0,000720	-0,001100	0,000156	0,001100
16	f	0,000000	0,000140	-0,000344	-0,000008	0,000123	-0,000164	0,000760	0,000001	-0,000971	0,000344	0,000971
17	g	-0,000001	-0,000017	-0,000079	0,000000	0,000091	0,000030	-0,000144	-0,000061	-0,001115	0,000091	0,001115
18	b3	0,000000	-0,000024	-0,000089	0,000198	-0,000010	0,000234	0,000572	0,000355	-0,001113	0,000234	0,001113
19	APXIMP	0,000000	0,000033	-0,000143	0,000000	0,000110	-0,000001	-0,000117	-0,000008	-0,001098	0,000143	0,001098
20	KinCheck1	-0,000001	0,000001	0,002969	0,000000	0,000107	-0,000001	-0,000608	-0,005412	0,033739	0,002969	0,033739
21	KinCheck1n	0,000001	-0,000003	-0,000099	0,000000	0,000102	0,000000	-0,000192	-0,000248	-0,001162	0,000102	0,001162
22	KinCheck2	0,000000	0,000010	-0,000091	0,000000	0,000080	0,000000	-0,000835	0,000001	-0,000401	0,000091	0,000835
23	KinCheck2n	-0,000009	0,000013	-0,000137	0,000007	0,000126	0,000006	0,001222	0,000001	-0,000731	0,000137	0,001222
24	KinCheck3	0,000000	-0,000068	-0,000043	0,000000	0,000111	0,000000	-0,000184	0,000001	-0,000955	0,000111	0,000955
25	KinCheck3n	0,000000	0,000106	-0,000284	0,000000	0,000179	0,000000	0,000745	0,000002	-0,001035	0,000284	0,001035
26	KinCheck4	0,000000	-0,000005	-0,000100	0,000001	-0,000094	-0,000044	0,000333	0,000001	-0,001190	0,000100	0,001190
27	KinCheck4n	0,000000	-0,000002	-0,000103	0,000000	-0,000030	0,000101	0,000311	0,000002	-0,001196	0,000103	0,001196
28	KinCheck5	0,000000	0,000000	-0,000106	0,000000	0,000106	0,000000	0,000286	0,000001	-0,001205	0,000106	0,001205
29	KinCheck5n	0,000000	-0,000006	-0,000097	0,000000	0,000104	0,000000	0,000345	0,000002	-0,001171	0,000104	0,001171
30	KinCheck6	0,000000	-0,000001	-0,000101	0,000000	0,000102	0,000003	0,000287	0,000001	-0,001159	0,000102	0,001159
31	KinCheck6n	0,000000	-0,000001	-0,000101	0,000000	0,000102	0,000004	0,000287	0,000002	-0,001158	0,000102	0,001158
MÉDIA		0,000225									0,002158	
DESVIO PADRÃO		0,000504274									0,005766585	
MÁXIMO		0,002969									0,033739	

Fonte: Elaboração própria (2026)

Figura 49 – Verificação para robô manipulador

Nr	Point_name	J1_error	J2_error	J3_error	J4_error	J5_error	J6_error	X_error	Y_error	Z_error	Max_joint_error	Max_cartesian_error
1	Home	0,000000	-0,000002	0,000004	0,000000	-0,000002	0,000000	0,000012	0,000000	0,000028	0,000004	0,000028
2	m	0,000000	0,000000	-0,000001	0,000000	0,000001	0,000000	-0,000002	0,000004	-0,000012	0,000001	0,000012
3	ShortBloAuto0	0,000000	0,000001	-0,000001	0,000000	0,000000	0,000000	-0,000008	-0,000001	0,000012	0,000001	0,000012
4	OFC2Auto0	0,000000	-0,000001	0,000000	0,000000	0,000001	-0,000002	0,000007	0,000000	-0,000010	0,000002	0,000010
5	ChapaIncl45	0,000000	0,000004	-0,000006	0,000003	0,000002	-0,000002	-0,000025	0,000005	0,000002	0,000006	0,000025
6	chapAuto11	0,000000	0,000010	-0,000017	0,000000	0,000007	-0,000002	-0,000026	-0,000001	0,000001	0,000017	0,000026
7	chapAuto8	0,000000	-0,000002	0,000003	0,000001	-0,000001	0,000001	0,000019	0,000000	-0,000004	0,000003	0,000019
8	TESTE	0,000000	0,000002	-0,000004	-0,000001	0,000002	-0,000001	-0,000007	0,000011	-0,000018	0,000004	0,000018
9	J4	0,000001	-0,000002	0,000004	-0,000004	0,000000	0,000001	0,000014	-0,000002	0,000019	0,000004	0,000019
10	Joasos2III	-0,000001	-0,000023	0,000042	0,000278	0,000007	0,000281	0,000004	-0,000002	0,000034	0,000281	0,000034
11	Joasos2	0,000001	-0,000001	0,000002	0,000000	-0,000002	-0,000003	-0,000007	-0,000011	0,000018	0,000003	0,000018
12	davi7	0,000000	0,000000	0,000000	-0,000001	-0,000007	0,000001	0,000000	-0,000003	0,000001	0,000007	0,000003
13	davi	0,000001	0,000003	-0,000002	-0,000007	0,000008	-0,000007	-0,000023	0,000001	0,000002	0,000008	0,000023
14	SNCT-14Auto2	-0,000001	-0,000003	0,000006	0,000000	-0,000002	0,000002	0,000011	0,000003	0,000021	0,000006	0,000021
15	OF5Auto4	-0,000001	0,000000	0,000001	-0,000001	0,000000	-0,000003	0,000009	0,000007	0,000005	0,000003	0,000009
16	OFC3Auto5	0,000001	0,000001	0,000001	0,000001	-0,000008	0,000001	-0,000017	-0,000004	0,000013	0,000008	0,000017
17	PETR-TCHALAuto0	-0,000001	-0,000002	0,000003	0,000005	-0,000002	0,000003	0,000014	0,000001	0,000005	0,000005	0,000014
18	PETRY1	-0,000001	0,000009	-0,000018	0,000061	0,000004	0,000058	0,000018	0,000001	-0,000041	0,000061	0,000041
19	A1Auto1	0,000000	0,000002	-0,000003	0,000000	0,000001	0,000002	-0,000007	0,000007	-0,000018	0,000003	0,000018
20	phAuto1	0,000000	-0,000002	0,000001	0,000000	0,000001	0,000000	-0,000012	0,000023	-0,000012	0,000002	0,000023
21	phAuto2	0,000000	0,000000	0,000001	0,000000	-0,000001	-0,000002	-0,000003	0,000005	0,000015	0,000002	0,000015
22	phAuto4	0,000000	-0,000001	0,000001	0,000000	0,000002	0,000000	0,000008	0,000000	-0,000006	0,000002	0,000008
23	phAuto5	0,000000	-0,000002	0,000002	0,000000	-0,000001	0,000000	0,000001	0,000000	0,000016	0,000002	0,000016
24	phAuto7	0,000000	-0,000001	0,000001	0,000000	0,000002	0,000000	0,000011	0,000000	-0,000004	0,000002	0,000011
25	phAuto8	0,000000	0,000015	-0,000029	0,000000	0,000014	-0,000001	-0,000003	0,000000	-0,000033	0,000029	0,000033
26	phAuto10	0,000000	0,000000	-0,000002	0,000000	-0,000002	-0,000002	0,000008	0,000000	-0,000028	0,000002	0,000028
27	phAuto11	0,000000	0,000003	-0,000003	0,000000	0,000000	0,000000	-0,000027	0,000000	-0,000003	0,000003	0,000027
28	phAuto13	0,000000	0,000003	-0,000001	0,000000	-0,000001	0,000000	-0,000029	0,000000	0,000016	0,000003	0,000029
29	phAuto14	0,000000	-0,000002	0,000003	0,000000	0,000006	0,000000	0,000015	0,000000	0,000012	0,000006	0,000015
30	phAuto16	0,000000	-0,000002	0,000001	0,000000	0,000001	0,000000	0,000022	0,000000	-0,000011	0,000002	0,000022
31	phAuto17	0,000000	0,000001	0,000000	0,000000	-0,000001	-0,000001	-0,000009	0,000000	0,000012	0,000001	0,000012

MÉDIA	0,000016	0,000020
DESVIO PADRÃO	4,97004E-05	8,43178E-06
MÁXIMO	0,000281	0,000041

Fonte: Elaboração própria (2026)

APÊNDICE D – REGISTROS DAS MEDIÇÕES DIMENSIONAIS

Figura 50 – Registros das medições das peças helicoidais

Medidas peças WAAM																
Hélice 1																
Cilindro							Hélice 1					Hélice 2				
Medida 1 Diâmetro interno (mm)	Medida 2 Diâmetro interno (mm)	Medida base Diâmetro externo	Medida centro Diâmetro externo	Medida topo Diâmetro externo	Medida 1 altura (mm)	Medida 2 altura (mm)	Largura do topo (mm)	Largura da base (mm)	Altura (mm)	Espessura 1 lado(mm)	Espessura 2 lado(mm)	Largura do topo (mm)	Largura da base (mm)	Altura (mm)	Espessura 1 lado(mm)	Espessura 2 lado(mm)
25,5	26,25	43,42	43,96	44,08	89,65	89,75	67,22	64,87	63,81	17,31	17,68	63,96	56,9	77,34	16,06	17,98
Médias	25,875		43,82		89,7						17,495					17,02

Hélice 2																
Cilindro							Hélice 1					Hélice 2				
Medida 1 Diâmetro interno (mm)	Medida 2 Diâmetro interno (mm)	Medida base Diâmetro externo (mm)	Medida centro Diâmetro externo (mm)	Medida topo Diâmetro externo (mm)	Medida 1 altura (mm)	Medida 2 altura (mm)	Largura do topo (mm)	Largura da base (mm)	Altura (mm)	Espessura 1 lado(mm)	Espessura 2 lado(mm)	Largura do topo (mm)	Largura da base (mm)	Altura (mm)	Espessura 1 lado(mm)	Espessura 2 lado(mm)
29,13	28,19	40,35	40,74	41,14	92,54	91,55	62,62	49,95	66,76	6,65	8,26	60,8	43,58	76,64	7,1	9,7
Médias	28,66		40,74333333		92,045						7,455					8,4

Fonte: Elaboração própria (2026)