

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

LUAN GUBERT DE SOUZA

**DESENVOLVIMENTO DE UMA CÉLULA ROBOTIZADA PARA
MANUFATURA ADITIVA A LASER COM ADIÇÃO DE ARAME**

FLORIANÓPOLIS, 2025.

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

LUAN GUBERT DE SOUZA

**DESENVOLVIMENTO DE UMA CÉLULA ROBOTIZADA PARA
MANUFATURA ADITIVA A LASER COM ADIÇÃO DE ARAME**

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
Bacharel em Engenharia Mecatrônica.

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

FLORIANÓPOLIS, 2025.

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor.

Souza, Luan Gubert

Desenvolvimento de uma célula robotizada para manufatura aditiva a laser com adição de arame / Luan Gubert de Souza;

Orientação de

Erwin Werner Teichmann, Florianópolis, SC 2025.

71 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. Trajetória de deposição 2. Descontinuidades. 3. Procedimento de soldagem. 4. Tecnologia *LASER*. 5. WLAM. I. Teichmann, Erwin Werner. II. Instituto Federal de Santa Catarina. III. Desenvolvimento de uma célula robotizada para manufatura aditiva a *laser* com adição de arame

**DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE METAL MECÂNICA
BACHARELADO EM ENGENHARIA MECATRÔNICA**

LUAN GUBERT DE SOUZA

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

Florianópolis, 26 julho, 2025.

Banca Examinadora:



Documento assinado digitalmente
ERWIN WERNER TEICHMANN
Data: 11/09/2025 19:55:44-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

**Erwin Werner Teichmann, Dr. Eng.
IFSC Florianópolis (orientador)**



Documento assinado digitalmente
NELSO GAUZE BONACORSO
Data: 12/09/2025 16:15:49-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Nelso Gauze Bonacorso, Dr. Eng. IFSC Florianópolis



Documento assinado digitalmente
JULIO CEZAR BARCELLOS DA SILVA
Data: 11/09/2025 20:21:25-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

**Julio Cezar Barcellos da Silva, Dr. Eng.
IFSC Florianópolis**

Dedico este trabalho
aos meus pais, Eliselino
Borges e Leila Gubert,
aos meus irmãos Cayo
Henrique e Bruna
Gubert.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela vida, pela saúde e pela oportunidade de chegar até este momento tão importante em minha trajetória. Aos meus pais e à minha família, pelo apoio incondicional, dedicação e incentivo constante, fundamentais para a realização deste trabalho e para o alcance dos meus objetivos. Aos meus amigos, que estiveram ao meu lado oferecendo força, companheirismo e inspiração para sempre buscar o meu melhor. Ao Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC) e às empresas que contribuíram para este projeto, fornecendo conhecimento, recursos e equipamentos indispensáveis para o seu desenvolvimento. Um agradecimento especial à empresa PowerMig, que, em parceria com o IFSC, possibilitou a aplicação prática deste trabalho. Aos que me auxiliaram de forma direta durante a idealização e execução do projeto, deixo minha sincera gratidão: ao meu orientador, Prof. Dr. Eng. Erwin Werner Teichmann, pela orientação, paciência e conhecimento transmitido; aos professores Nelso Gauze Bonacorso e Vítor Farias de Borba, pelo apoio acadêmico e profissional; e aos colegas Jorge Ricardo, Filipe Braga Pires e Eduardo Costa Kuner, pelo auxílio e colaboração ao longo desta jornada.

“A mente que se abre a
uma nova ideia jamais
voltará ao
seu tamanho original”
Albert Einstein

RESUMO

Nos últimos anos, a globalização do mercado tornou-se mais evidente, com a transmissão instantânea de informações em escala global. Diante desse cenário, as indústrias precisam se modernizar rapidamente, investindo em tecnologias avançadas para se manterem competitivas, equilibrando qualidade, produtividade e custos. Nesse contexto, a tecnologia laser se evidencia, oferecendo uma solução inovadora e econômica na manufatura aditiva (MA) de metais. O presente trabalho descreve o desenvolvimento de uma célula robotizada para a produção de peças em aço carbono pelo processo de manufatura aditiva a laser com adição de arame (WLAM). Os resultados obtidos demonstraram o funcionamento eficaz da célula robotizada e a integração entre os sistemas. Apesar de não ter sido mensurada, a simplicidade do processo e o aproveitamento do material indicam um potencial para redução de custos em aplicações futuras. Entretanto, em função de diversos fatores, as peças não atingiram o nível de qualidade almejado, o qual incluía a obtenção de cordões isentos de porosidades, boa fusão entre camadas e uniformidade dimensional. Esses achados sugerem que, embora a célula robótica demonstre potencial, o refinamento de parâmetros de soldagem é crucial para alcançar a qualidade das peças desejadas.

Palavras-chave: Trajetória de deposição, Descontinuidades, Procedimento de soldagem, Tecnologia *laser*, WLAM.

ABSTRACT

In recent years, market globalization has become more evident, with the instant transmission of information on a global scale. In this scenario, industries must modernize rapidly by investing in advanced technologies to remain competitive, balancing quality, productivity, and costs. In this context, laser technology stands out as an innovative and economical solution for metal additive manufacturing (AM). This work describes the development of a robotic cell for the production of carbon steel parts using the wire-based laser additive manufacturing process (WLAM). The results demonstrated the effective operation of the robotic cell and the successful integration of its systems. Although cost reduction was not measured, the simplicity of the process and the efficient use of material suggest potential for cost savings in future applications. However, due to several factors, the parts did not achieve the desired quality level, which included pore-free weld beads, good interlayer fusion, and dimensional uniformity. These findings suggest that, although the robotic cell shows potential, refining the welding parameters is crucial to achieving the desired part quality.

Keywords: Deposition path, Discontinuities, Welding procedure, Laser technology, WLAM.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Célula robotizada de soldagem (a) braço robótico articulado, (b) máquina de solda, (c) caixa de controle (inteligência da célula), (d) interface de operação (teach pendant), (e) mesa ou posicionador da peça	22
Figura 2 - Diferença entre feixe de laser e luz normal	23
Figura 3 - Tipos de interação do feixe de <i>laser</i> com a poça de fusão (a) início da incidência, (b) reflexão superficial, (c) formação da poça de fusão, (d) penetração profunda em modo <i>keyhole</i>	24
Figura 4 - Classificação das tecnologias para a Manufatura Aditiva Metálica	25
Figura 5 - Esquema do processo WLAM com vista frontal e superior, ilustrando a alimentação do arame	27
Figura 6 – (a) robô FANUC M-10iA, (b) controlador R-30iA	31
Figura 7 - Fonte Laser DMK 1500W	32
Figura 8 - (1) bicos e suporte para direcionamento do arame (2) parte interna alimentador arame, (3) alimentador de arame, (4) interface alimentador de arame..	33
Figura 9 - Mesa modular patenteada	34
Figura 10 - Modelo CAD do suporte A para fixação da pistola laser	35
Figura 11 - Modelo CAD do suporte B para fixação da pistola laser	36
Figura 12 - Imagem do robô FANUC com o suporte e tocha a laser acoplado	36
Figura 13 - Diagrama de Interligação dos Equipamentos	37
Figura 14 - Configuração da área de trabalho	38
Figura 15 - Parâmetros de operação configurados no sistema de controle do laser e motor oscilatório	39
Figura 16 - Parâmetros de rampa e controle de gás configurados no sistema do laser	40
Figura 17 - Interface de ajuste da posição do feixe de luz vermelha auxiliar	41
Figura 18 - Interface e parâmetros configurados no alimentador de arame do sistema	42
Figura 19 - Marcação dos pontos de impacto do feixe a diferentes distâncias para calibração óptica do laser	43
Figura 20 - Variação do diâmetro médio do feixe laser em função da distância focal	44
Figura 21 - Cordões de solda obtidos com diferentes combinações de velocidades de	

alimentação do arame (V_a) e de soldagem (V_s)	45
Figura 22 - Macrografias dos cordões de solda correspondentes às Amostras 1 a 4 após corte transversal	45
Figura 23 - Parâmetros geométricos do cordão de solda, onde: L: largura, R: reforço, P: penetração, A_d : área depositada, A_f : área fundida, α e β : ângulos de borda do cordão	46
Figura 24 - Comparação dos parâmetros dos cordões de solda	47
Figura 25 - Macrografia do cordão de solda correspondente aos parâmetros ($V_a = 10$ mm/s, $V_s = 4$ mm/s)	48
Figura 26 - Estratégia de deposição adotada para controle térmico e estabilidade dimensional entre camadas pares e ímpares	49
Figura 27 - Esquemático tradicional do modelo de sobreposição	49
Figura 28 - Padrões de distância entre centros diferentes d (distância central)	50
Figura 29 - Camada depositada com 30% de sobreposição, ($V_a = 10$ mm/s, $V_s = 4$ mm/s)	52
Figura 30 - Fluxograma funcionamento do robô	55
Figura 31 - Modelo geométrico	56
Figura 32 - Visão geral da célula robotizada montada para o processo WLAM	58
Figura 33 - Célula robotizada montada para o processo WLAM	58
Figura 34 - Protótipo construído para validação da célula robótica ($V_a = 10$ mm/s, $V_s = 4$ mm/s)	59
Figura 35 - Macrografia da torre metálica construída ($10 \times 10 \times 30$ mm)	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química do material do substrato e de adição em valores percentuais.....	34
Tabela 2 - Comparativo dos melhores cordões de solda conforme variação de V_a e V_s	46
Tabela 3 - Avaliação da qualidade das camadas em função da taxa de sobreposição	51

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

WLAM	Wire Laser Additive Manufacturing (Manufatura Aditiva a Laser com Adição de Arame)
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (Amplificação da Luz por Emissão Estimulada de Radiação)
IFSC	Instituto Federal de Santa Catarina
TCP	Tool Center Point (Ponto Central da Ferramenta)
ZTA	Zona Termicamente Afetada
CNC	Comando Numérico Computadorizado
CAD	Computer-Aided Design (Projeto Assistido por Computador)
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
MA	Manufatura Aditiva
LBW	Laser Beam Welding
WBAM	Wire-Based Additive Manufacturing
GND	Ground (Terra elétrica)

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	16
2.	JUSTIFICATIVA	18
2.1.	DEFINIÇÃO DO PROBLEMA	19
2.2.	OBJETIVO GERAL.....	19
2.3.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	19
2.4.	ESTRUTURA DO TRABALHO	20
3.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	21
3.1.	CÉLULAS ROBOTIZADAS DE SOLDAGEM.....	21
3.1.1.	Principais vantagens das células robotizadas	21
3.1.2.	Equipamentos necessários	22
3.2.	<i>LASER</i>	22
3.2.1.	Soldagem a <i>laser</i>	23
3.3.	MANUFATURA ADITIVA DE METAIS	24
3.4.	MANUFATURA ADITIVA A <i>LASER</i> COM ADIÇÃO DE ARAME - WLAM	26
3.5.	PARÂMETROS DE SOLDAS.....	27
4.	DESENVOLVIMENTO DO PROJETO.....	31
4.1.	IDEALIZAÇÃO DO PROJETO.....	31
4.2.	EQUIPAMENTOS UTILIZADOS	31
4.2.1.	Desenvolvimento do suporte.....	34
4.3.	INTEGRAÇÃO DO SISTEMA <i>LASER</i> COM ROBÔ	37
4.4.	MONTAGEM E CONFIGURAÇÃO DA CÉLULA ROBOTIZADA	38
4.5.	CALIBRAÇÃO ÓPTICA DO <i>LASER</i>	43
4.6.	PARÂMETROS DE SOLDAGEM	44
4.7.	MÉTODOS DE DEPOSIÇÃO DE CAMADAS	48
4.7.1.	Definição sobreposição das camadas	49
4.8.	PROGRAMAÇÃO DO ROBÔ.....	53
4.9.	VALIDAÇÃO DA CÉLULA ROBÓTICA PARA WLAM.....	56
5.	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	58
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	62
6.1.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	62
	REFERÊNCIAS.....	63

APÊNDICE A – Suporte da tocha laser: Peça A (desenho técnico).....	66
APÊNDICE B – Suporte da tocha laser: Peça B (desenho técnico).....	67
APÊNDICE C – Trecho principal (<i>main</i>) da programação do robô para o processo WLAM	68
APÊNDICE D – Programa de deposição para camadas ímpares no processo WLAM	69
APÊNDICE D – Programa de deposição para camadas pares no processo WLAM	70
APÊNDICE E – Código do robô para deposição do cordão	71

1. INTRODUÇÃO

A impressão 3D, ou manufatura aditiva (MA), deixou de ser apenas uma inovação e já está bastante presente em diversas áreas da indústria. Como apontado por Gibson et al. (2021), esse tipo de processo permite fabricar peças com boa precisão e aproveitamento de material, o que representa uma vantagem importante em relação aos métodos convencionais. Isso tem feito com que setores como o aeroespacial, o automotivo e até o biomédico adotem essa tecnologia, principalmente por ela facilitar a criação de formas complexas e personalizadas, muitas vezes com menos custo.

No campo da manufatura aditiva de metais, destaca-se o processo de Manufatura Aditiva a Laser com Adição de Arame (WLAM, do inglês *Wire Laser Additive Manufacturing*). Nesse tipo de processo, um feixe de laser é responsável por fundir o arame metálico diretamente sobre a superfície de uma base metálica (substrato), o que permite a construção das peças camada por camada. Quando o sistema é bem ajustado, principalmente no que diz respeito à potência do laser e à velocidade com que o arame é alimentado, é possível alcançar uma boa qualidade superficial e propriedades mecânicas satisfatórias. Em comparação com os métodos que utilizam pó metálico, o WLAM costuma ter algumas vantagens importantes, como menor custo dos materiais, mais segurança no manuseio e menos desperdício (Ding et al., 2018).

A automação é essencial para maximizar os benefícios desse processo. Usar células robotizadas ajuda a controlar de forma mais precisa os movimentos tanto do laser quanto do arame, o que contribui para uma deposição mais estável e uniforme. Esse tipo de controle facilita também o uso da técnica em diferentes tipos de geometrias e materiais, o que amplia bastante o potencial de aplicação na indústria. Por outro lado, ainda existem alguns desafios técnicos. Um deles é manter a sincronia entre os movimentos do robô, a velocidade com que o arame é alimentado e a potência do laser durante a operação. A literatura técnica ainda traz poucos estudos que tratam dessa integração de forma mais aprofundada, o que mostra que há espaço para novas pesquisas nessa área (Casalino et al., 2023).

Diante desse cenário, este trabalho tem como objetivo desenvolver e implementar uma célula robotizada voltada ao processo WLAM, buscando a

otimização da deposição camada por camada. Ao explorar a integração entre o sistema robótico e os parâmetros de soldagem a *laser* com arame, pretende-se demonstrar o potencial da técnica como uma alternativa viável, eficiente e adaptável para a fabricação de peças metálicas em aplicações de alta exigência tecnológica.

2. JUSTIFICATIVA

A aplicação da tecnologia de Manufatura Aditiva a *Laser* com Adição de Arame (WLAM) ainda enfrenta desafios quando se busca torná-la viável em contextos de infraestrutura limitada, como instituições de ensino ou pequenas empresas. Isso se deve, em grande parte, à complexidade dos sistemas comerciais disponíveis, que frequentemente exigem equipamentos de alto custo, infraestrutura especializada e software dedicado.

Diante disso, este trabalho propõe o desenvolvimento de uma célula robotizada para o processo WLAM, concebida a partir dos recursos já disponíveis no Instituto Federal de Santa Catarina, como o robô FANUC M-10iA, uma fonte de laser DMK 1500W e uma estrutura de apoio modular. A proposta visa demonstrar que, mesmo utilizando uma infraestrutura acadêmica, é possível obter resultados relevantes e reprodutíveis na manufatura aditiva metálica.

Além da validação técnica do processo, o projeto busca contribuir com dados experimentais que auxiliem na definição de parâmetros operacionais ideais, como potência do *laser*, avanço do robô, taxa de alimentação de arame e vazão do gás de proteção. Ao realizar essa análise, pretende-se oferecer subsídios para futuros estudos e aplicações da tecnologia WLAM em ambientes acadêmicos ou produtivos que demandem soluções acessíveis, práticas e adaptáveis.

2.1. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

Diante da crescente pressão por redução de custos e da necessidade de inovação nos processos de fabricação, propôs-se o desenvolvimento de uma célula robotizada para manufatura aditiva a laser com adição de arame. O objetivo é oferecer uma alternativa mais acessível, segura e eficiente em relação a tecnologias consolidadas como a deposição a laser com pó metálico. A célula desenvolvida busca aliar precisão, flexibilidade e automação, incorporando conceitos da Indústria 4.0, como integração entre sistemas digitais e adaptação dos parâmetros de processo, de forma a reduzir o alto custo de insumos e a complexidade observada em sistemas convencionais.

2.2. OBJETIVO GERAL

Projetar e implementar uma célula robotizada integrando uma fonte de *laser* e um robô industrial FANUC, com o objetivo de viabilizar a manufatura aditiva de metais por meio do processo *Wire Laser Additive Manufacturing* (WLAM).

2.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para atingir o objetivo de desenvolver a célula robotizada, foram estabelecidas as seguintes metas específicas:

- a) Projetar e fabricar um suporte para fixação da tocha de *laser* e do alimentador de arame na garra do robô FANUC;
- b) Realizar a integração entre o sistema de *laser* e o robô;
- c) Configurar e preparar o sistema;
- d) Efetuar a calibração óptica do sistema de *laser*;
- e) Estabelecer os parâmetros de soldagem ideais para WLAM;
- f) Programar as trajetórias do robô para realizar a deposição em camadas;
- g) Executar testes de parametrização das camadas e documentar os experimentos realizados;
- h) Construir uma torre metálica com dimensões de 10mm × 10mm × 30mm como forma de validação funcional da célula robotizada desenvolvida.

2.4. ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho está estruturado em quatro capítulos principais. O capítulo Fundamentação Teórica explora os conceitos fundamentais relacionados ao tema. No capítulo Desenvolvimento do Projeto, são descritos o processo de concepção, a criação do suporte, a integração e a configuração do sistema. Em seguida, o capítulo Análise e Discussão dos Resultados avalia se o produto atingiu os objetivos estabelecidos. Finalmente, o capítulo Considerações Finais oferece uma perspectiva do autor sobre o que poderia ter sido feito de maneira diferente e sugerir modificações para o aprimoramento de uma futura versão do produto.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, é apresentada uma revisão da literatura acerca dos principais tópicos envolvidos no desenvolvimento deste trabalho.

3.1. CÉLULAS ROBOTIZADAS DE SOLDAGEM

As células robotizadas de soldagem começaram a se desenvolver com o avanço da automação industrial nas décadas de 1970 e 1980, impulsionadas pela crescente demanda da indústria automobilística por processos mais produtivos, padronizados e eficientes. Essa necessidade exigia soluções que reduzissem o tempo de ciclo e os custos operacionais, ao mesmo tempo em que aumentavam a repetibilidade e a qualidade das juntas soldadas.

A indústria automotiva foi pioneira na aplicação de robôs em processos de soldagem por pontos, obtendo ganhos significativos de qualidade e produtividade. A automação robótica possibilitou a padronização das soldas, reduzindo a variabilidade causada pela intervenção humana e diminuindo drasticamente o tempo de produção (Groover, 2010).

3.1.1. Principais vantagens das células robotizadas

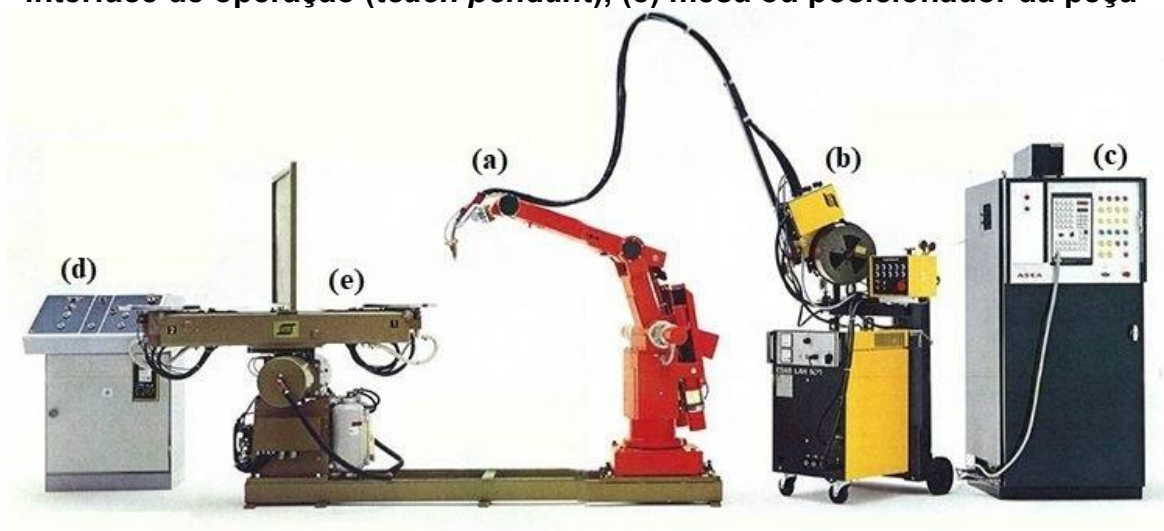
O avanço da automação industrial promoveu mudanças significativas nos processos de soldagem, com a introdução das células robotizadas. Essas células oferecem uma série de benefícios técnicos e econômicos, tornando-se uma alternativa cada vez mais adotada nas indústrias modernas:

1. Aumento da produtividade: Robôs podem operar continuamente, 24 horas por dia, sem pausas, garantindo uma produção ininterrupta e maior rendimento.
2. Redução de custos operacionais: Apesar do investimento inicial elevado, os custos a longo prazo são reduzidos devido à menor incidência de retrabalho, desperdício de material e custos com mão de obra (Kalpakjian et al., 2008).
3. Melhoria na segurança: Ao substituir operadores em tarefas de risco, os sistemas robotizados reduzem a exposição a ambientes perigosos, como altas temperaturas e atmosferas com gases tóxicos (Groover, 2010).

3.1.2. Equipamentos necessários

A construção de uma célula robotizada de soldagem exige a integração de diferentes dispositivos que atuam de forma coordenada para garantir a precisão, repetibilidade e segurança do processo. A Figura 1 apresenta uma estrutura típica de célula robotizada de soldagem.

Figura 1 – Célula robotizada de soldagem (a) braço robótico articulado, (b) máquina de solda, (c) caixa de controle (inteligência da célula), (d) interface de operação (*teach pendant*), (e) mesa ou posicionador da peça



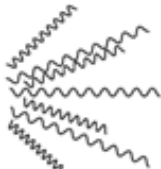
Fonte: Fernandes et al. (2022).

3.2. LASER

O *laser*, acrônimo de *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* (Amplificação da Luz por Emissão Estimulada de Radiação), é uma fonte de radiação eletromagnética que se destaca por sua alta intensidade, coerência temporal e espacial, e monocromaticidade. Diferentemente da luz convencional, que se propaga em várias direções e possui múltiplos comprimentos de onda, o feixe de *laser* é altamente direcional, concentrando sua energia em um único ponto de forma controlada e precisa (Hitz; Hecht, 2012 apud Silva, 2020).

Essas propriedades fazem do *laser* uma ferramenta versátil na indústria, especialmente em aplicações de corte, marcação, tratamento térmico e soldagem. A Figura 2 ilustra a diferença entre o comportamento de um feixe de luz comum e um feixe de *laser*.

Figura 2 - Diferença entre feixe de *laser* e luz normal

Luz Laser	Luz não Laser (ex: Lanterna)
Monocromática 	Policromática 
Coerente 	Incoerente 
Colimada 	Divergente 

Fonte: Adaptado de Hitz e Hecht (2012), citado por Silva (2020).

3.2.1. Soldagem a *laser*

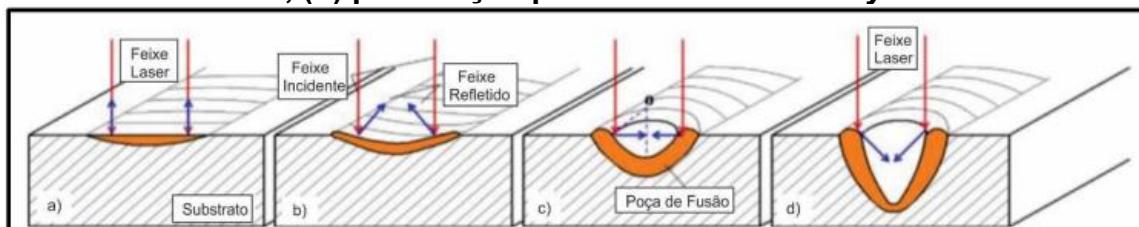
A soldagem por feixe de *laser*, ou *Laser Beam Welding* (LBW), destaca-se pela elevada densidade de potência do feixe, que permite altas velocidades de soldagem, penetração profunda e zonas termicamente afetadas reduzidas (BARBETTA, 2019). Conforme a intensidade do feixe, o processo pode operar em dois modos distintos: condução térmica e penetração (*keyhole*).

No modo por condução térmica, o *laser* possui densidade de potência moderada, sendo a energia absorvida pelo material predominantemente por condução. Isso gera uma poça de fusão superficial, com controle térmico elevado, baixo risco de respingos e ausência de porosidade. Além disso, como esse modo permite o uso de feixes mais largos e menor exigência quanto à qualidade óptica, seu custo operacional é reduzido. É amplamente empregado em setores como o automotivo, eletrônico e médico (Silva, 2020).

Quando a densidade de potência aumenta, atinge-se o modo de penetração (*keyhole*), em que a energia do feixe ultrapassa o ponto de ebulição do material, formando uma coluna de vapor na poça de fusão. Esse canal, chamado capilar de vapor, permite múltiplas reflexões internas do feixe,

aumentando sua eficiência de absorção e penetração (Poprawe, 2011). A Figura 3 ilustra os diferentes mecanismos de interação do feixe com o material.

Figura 3 - Tipos de interação do feixe de *laser* com a poça de fusão (a) início da incidência, (b) reflexão superficial, (c) formação da poça de fusão, (d) penetração profunda em modo *keyhole*



Fonte: Adaptada de NADZAM (2006).

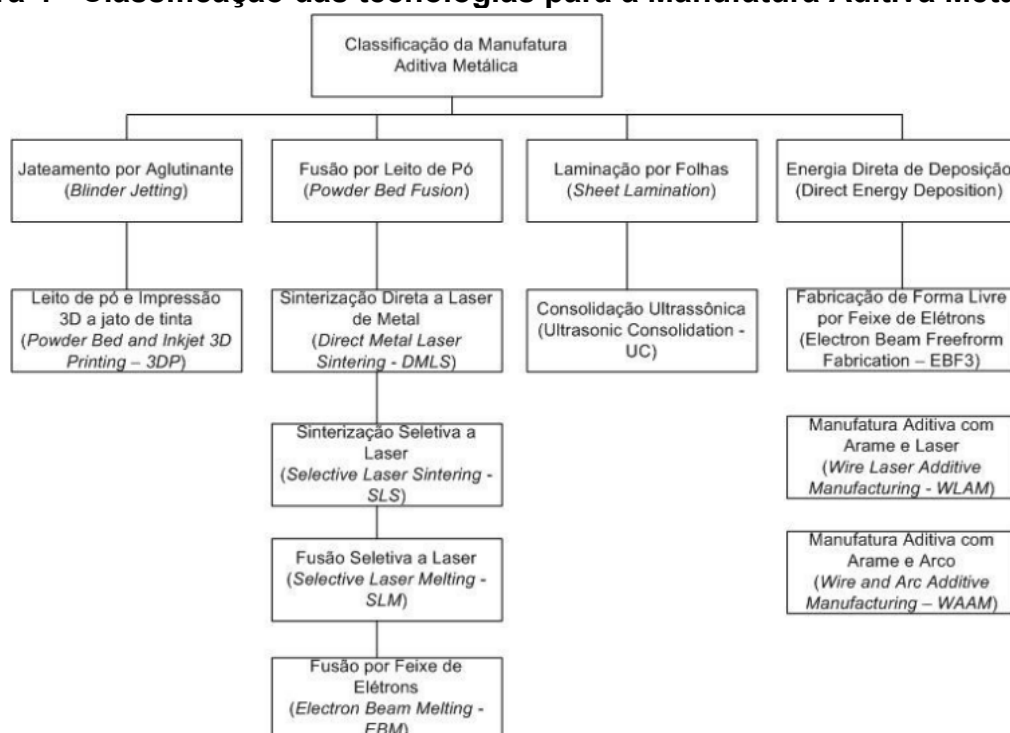
O modo *keyhole* proporciona soldas com penetração profunda, baixa ZTA e alta produtividade, sendo amplamente adotado em aplicações industriais que exigem precisão e desempenho térmico otimizado (Poprawe, 2011).

3.3. MANUFATURA ADITIVA DE METAIS

Nos primeiros anos do século XXI, as técnicas de prototipagem rápida começaram a ganhar destaque globalmente. Com o tempo, essas técnicas evoluíram para o que hoje se conhece como manufatura aditiva (MA), que passou a ocupar papel de destaque em setores industriais como o aeroespacial, automotivo e de próteses médicas, em razão de sua capacidade de reduzir custos e acelerar ciclos de desenvolvimento (NGO et al., 2018).

No contexto da manufatura aditiva metálica, os processos são classificados em quatro grandes grupos: Jateamento por Aglutinante (*Binder Jetting*), Fusão por Leito de Pó (*Powder Bed Fusion*), Laminação por Folhas (*Sheet Lamination*) e Deposição por Energia Direta (*Direct Energy Deposition*). Cada um desses grupos engloba técnicas específicas, como Sinterização Seletiva a *Laser* (SLS), Fusão Seletiva a *Laser* (SLM), Manufatura Aditiva com Arame e *Laser* (WLAM), entre outras, conforme ilustrado na Figura 4.

Figura 4 - Classificação das tecnologias para a Manufatura Aditiva Metálica



Fonte: Adaptada de Li et al. (2019).

Essas tecnologias se diferenciam principalmente pelo tipo de matéria-prima utilizada (pó, arame, folhas) e pela fonte de energia empregada (*laser*, feixe de elétrons, ultrassom, entre outros). A escolha do processo depende de diversos fatores, como a geometria da peça, propriedades desejadas, material disponível, produtividade e custo.

Entre as abordagens mais recentes da manufatura aditiva aplicada a metais, a técnica conhecida como Manufatura Aditiva com Arame (MAA), ou *Wire-Based Additive Manufacturing* (WBAM), tem se destacado. Um dos principais motivos é o fato de ela contornar certas limitações que ocorrem em processos com pó metálico, como a necessidade de cuidados extras no manuseio e a restrição à construção exclusivamente na orientação plana. Na MAA, o material utilizado é o arame metálico, que é fundido camada por camada por meio de fontes de energia concentrada, como *laser* ou feixe de elétrons. Dentro desse grupo, duas variações se destacam: a Manufatura Aditiva com Arame e *Laser* (WLAM) e a com Arame e Arco Elétrico (WAAM). Ambas oferecem boas vantagens em produtividade, com taxas de deposição que podem variar de 2 a 10 g/min, o que as torna interessantes para aplicações de médio e grande

porte (Li et al., 2019).

A ampla variedade de tecnologias de manufatura aditiva metálica permite atender às diversas necessidades da indústria moderna, viabilizando a produção de peças com geometrias complexas, menor desperdício de material e maior eficiência produtiva. Nesse cenário, o uso de tecnologias como a WLAM torna-se altamente estratégico, especialmente quando se busca integração com sistemas robóticos e automação industrial.

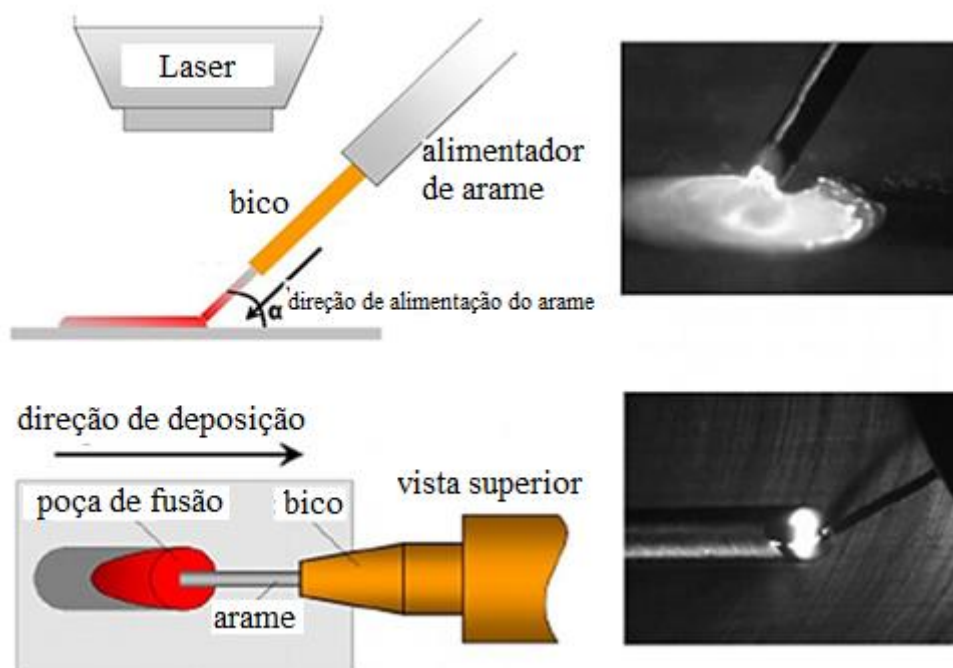
3.4. MANUFATURA ADITIVA A LASER COM ADIÇÃO DE ARAME - WLAM

A manufatura aditiva a *laser* com adição de arame é um método cada vez mais utilizado na fabricação de peças metálicas de alta densidade. Esse processo utiliza arame metálico como material de adição e um feixe de laser como fonte de calor para realizar a deposição. O sistema geralmente envolve um laser de alta potência, um alimentador de arame, além de um mecanismo de movimentação - como um robô industrial ou uma mesa CNC. Também são utilizados dispositivos auxiliares, responsáveis pela proteção gasosa e controle da temperatura durante a operação (Abuabiah et al., 2023).

Conforme ilustrado esquematicamente na Figura 5, o feixe de *laser* incide sobre o substrato metálico, gerando uma poça de fusão, enquanto o arame é continuamente alimentado em um ângulo adequado (α) e derretido pela ação térmica. Esse material fundido se une ao substrato, formando uma ligação metalúrgica sólida. O movimento coordenado entre a cabeça do *laser* e o alimentador, ou ainda do próprio substrato, resulta na formação sucessiva de cordões metálicos, permitindo a construção camada por camada da geometria desejada (Ding et al., 2017).

Além da vista lateral do processo, a imagem apresenta também uma vista superior, que evidencia a deposição do material e a interação entre o arame, o feixe de *laser* e a poça de fusão. As fotografias reais complementares mostram a operação do sistema durante a fusão do arame sobre o substrato.

Figura 5 - Esquema do processo WLAM com vista frontal e superior, ilustrando a alimentação do arame



Fonte: Adaptado de Tebianianian et al. (2023).

O processo WLAM apresenta grande flexibilidade, podendo ser aplicado a diferentes metais e ligas metálicas. A qualidade do material depositado está diretamente relacionada tanto às propriedades do arame - como diâmetro e composição química - quanto aos parâmetros do processo, incluindo potência do laser, velocidade de deposição e taxa de alimentação. Esses elementos exercem influência direta sobre a forma e uniformidade dos cordões, o acabamento superficial, a microestrutura e até mesmo as propriedades mecânicas da peça final (TEICHMANN et al., 2023).

3.5. PARÂMETROS DE SOLDAGEM

Na manufatura aditiva a laser com adição de arame, escolher bem os parâmetros do processo é algo fundamental para que se consiga bons resultados. Elementos como a potência do laser, o tamanho do feixe, a velocidade com que a tocha se move, e até o tipo de gás usado na proteção, fazem bastante diferença. Todos esses fatores vão afetar diretamente a forma como o material é depositado, se os cordões saem com boa qualidade, se não

há falhas internas, e se o calor é distribuído de forma controlada durante o processo. Quando esses ajustes não são bem definidos, é comum surgirem problemas como instabilidade térmica, defeitos metalúrgicos ou perda de repetibilidade na fabricação.

Potência do *Laser* (P)

A potência do *laser* é um dos parâmetros mais relevantes do processo, pois afeta diretamente a taxa de deposição e a qualidade da fusão. Para a combinação entre o substrato ASTM A36 e o arame ER70S-6, a faixa ideal situa-se entre 800 e 1100 W, suficiente para garantir a fusão sem gerar vaporização excessiva ou respingos. Potências superiores a 1200 W podem causar porosidades e instabilidades térmicas na poça de fusão (Ghanadi & Pasebani, 2024).

Diâmetro do Feixe (D)

O diâmetro do feixe influencia diretamente a área de aplicação da energia. Para *lasers* de fibra, recomenda-se um *spot size* entre **0,8 e 1,0 mm**, garantindo boa concentração de energia com controle térmico adequado. Feixes com diâmetro inferior a 0,5 mm tendem a concentrar energia em excesso, enquanto valores superiores a 1,0 mm resultam em dispersão térmica excessiva (Ghanadi & Pasebani, 2024).

Intensidade do *Laser* (I)

A intensidade do feixe é calculada pela fórmula:

$$I = \frac{P}{(\pi \cdot r^2)} \quad [1]$$

Onde:

I = intensidade (W/cm^2)

P = potência do laser (W)

r = raio do feixe (cm)

A intensidade ideal deve se manter entre 1×10^4 e 3×10^4 W/cm², faixa que assegura fusão estável e evita vaporização excessiva ou instabilidades térmicas. Ensaios realizados com aço ASTM A36 demonstram que valores dentro desse intervalo proporcionam penetração ideal e formação de cordões consistentes (Fissmer et al., 2025).

Velocidade de Deslocamento (v)

A velocidade de deslocamento do cabeçote *laser* ou do robô deve ser mantida entre 4 e 9 mm/s (equivalente a 240 a 540 mm/min). Essa faixa proporciona o equilíbrio entre a entrada de calor e a formação adequada do cordão. Velocidades muito baixas podem resultar em sobreaquecimento e acúmulo de material, enquanto velocidades elevadas podem comprometer a fusão do material (LI et al., 2025).

Fluxo de Massa (m)

Para o arame ER70S-6 (1,0 mm), o fluxo de massa ideal situa-se entre 3,5 e 5,5 g/min, devendo ser compatibilizado com a potência e a velocidade de deslocamento. Valores fora dessa faixa podem resultar em defeitos de deposição, como excesso de material ou falta de continuidade (Li et al., 2025; Ghanadi & Pasebani, 2024).

Cálculo da Conversão de Fluxo de Massa para Velocidade de Avanço do Arame:

Densidade do ER70S – 6: $\approx 7,85$ g/cm³

Diâmetro do arame: 1,0 mm

1. Calcular a área da seção transversal do arame:

$$A = \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 [2] = \pi \cdot \left(\frac{0,1}{2}\right)^2 = \pi \cdot 0,0025 = 0,00785 \text{ cm}^2$$

2. Calcular o volume por minuto para um determinado fluxo de massa:

$$Volume = \frac{massa}{densidade} [3] = \frac{3,5}{7,85} \approx 0,446 \text{ cm}^3/\text{min até } \frac{3,5}{7,85} \approx 0,701 \text{ cm}^3/\text{min}$$

3. Calcular o comprimento correspondente (velocidade de avanço do arame):

$$Comprimento = \frac{volume}{\text{área da seção}} [4] = \frac{0,446}{0,00785} \approx 56,8 \frac{\text{mm}}{\text{min}} \text{ até } \frac{0,701}{0,00785} \approx 89,3 \text{ mm/min}$$

57 a 89 mm/min

Ou

9,46 a 14,87 mm/s

Gás de Proteção

Recomenda-se o uso de argônio 100% puro, com vazão entre 8 e 10 L/min, o que assegura proteção eficaz da poça de fusão, prevenindo oxidação, formação de porosidades e instabilidade térmica. Vazões superiores a 10 L/min não apresentaram benefícios adicionais significativos em testes práticos (Li et al., 2025; Fissmer et al., 2025).

Distribuição da Intensidade

A melhor distribuição de intensidade do feixe para este processo é o perfil gaussiano, que proporciona uma intensidade uniforme em toda a área irradiada. Isso reduz o risco de formação de *hotspots* (pontos muito quentes), evitando respingos e assegurando a regularidade do cordão (Ghanadi & Pasebani, 2024).

4. DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

O capítulo Desenvolvimento do projeto aborda a evolução desde a idealização até a concretização do produto.

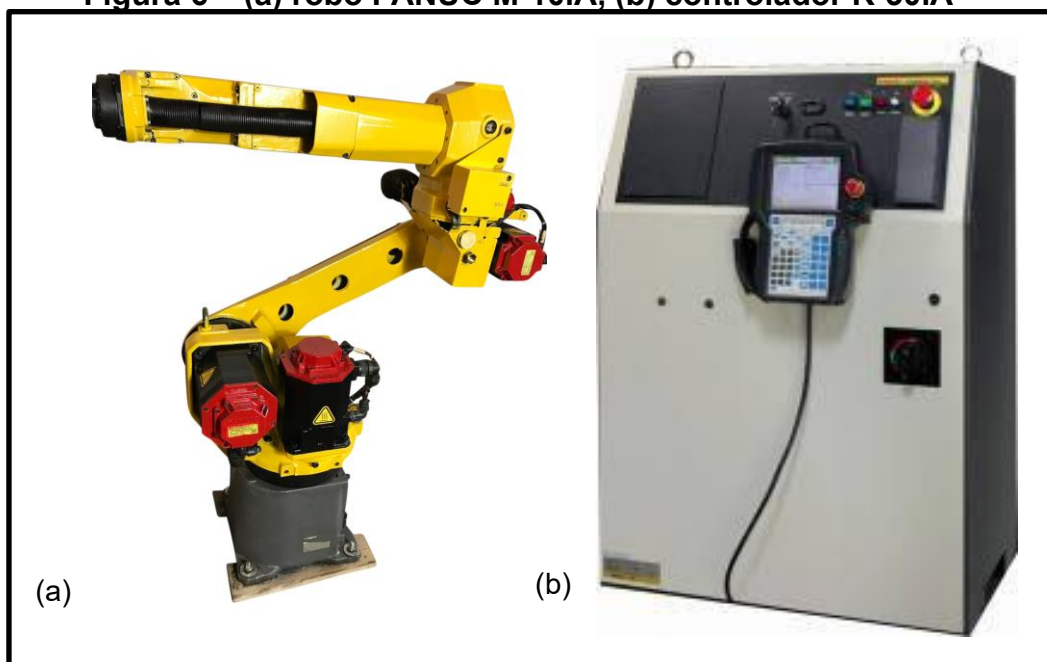
4.1. IDEALIZAÇÃO DO PROJETO

A idealização do projeto surgiu a partir de uma parceria entre a empresa *POWERMIG* e o Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC), com o objetivo de desenvolver uma célula robotizada para aplicação na manufatura aditiva de metais, utilizando tecnologia a *laser*.

4.2. EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

- Robô FANUC M-10iA com controlador R-30iA: Responsável pela manipulação da pistola de soldagem e inteligência da célula. Ambos os componentes podem ser visualizados na Figura 6.

Figura 6 – (a) robô FANUC M-10iA, (b) controlador R-30iA



Fonte: Autoria própria (2025).

- Fonte *Laser* DMK 1500W: Equipamento atua como fonte térmica no processo de soldagem a laser, sendo apresentada na Figura 7.

Figura 7 - Fonte *Laser* DMK 1500W



Fonte: Autoria própria (2025).

- Alimentador de arame e bico: O alimentador de arame é responsável pelo fornecimento contínuo de arame durante a operação do *laser*, garantindo que o material seja depositado corretamente no substrato. O bico tem dupla função: guia o arame para que fique corretamente posicionado na poça de solda, ao mesmo tempo em que direciona o fluxo do gás de proteção pela área da solda, protegendo-a da oxidação e da contaminação externa. Ambos os itens estão dispostos na figura 8.

Figura 8 - (1) bicos e suporte para direcionamento do arame (2) parte interna alimentador arame, (3) alimentador de arame, (4) interface alimentador de arame



Fonte: Autoria própria (2025).

- **Gás de proteção:** O argônio foi selecionado como gás de proteção devido à sua pureza e por ser um gás inerte, o que evita reações com o metal fundido e o ambiente. Esta escolha previne a oxidação do cordão de solda e protege a área de soldagem de contaminações externas.
- **Mesa de perfil de alumínio:** Trata-se de uma mesa modular patenteada pelo IFSC e criada pelo Dr. Eng. Nelso Gauze Bonacorso, projetada para múltiplas aplicações de fixação. Devido à sua disponibilidade e versatilidade, foi escolhida para compor a célula robotizada, facilitando a fixação dos substratos durante os testes de manufatura aditiva. Figura 9 ilustra a mesa patenteada.

Figura 9 - Mesa modular patenteada



Fonte: Autoria própria (2025).

- Substrato: chapa de aço carbono ASTM A36 de dimensões 150 x 70 x 5 mm e composição química dada pela Tabela 1.
- Material de adição: arame ER 70S-6 de 1,0 mm de diâmetro e composição química dada pela Tabela 1.

Tabela 1 - Composição química do material do substrato e de adição em valores percentuais

Materiais utilizados	C	Si	Mn	P	S
ASTM A36	≤ 0,25	≤ 0,40	0,80 – 1,20	≤ 0,04	≤ 0,05
AWS ER70S-6	0,06 - 0,15	0,80 – 1,15	1,40 – 1,85	≤ 0,02	≤ 0,03

Fonte: Autoria própria (2025).

4.2.1. Desenvolvimento do suporte

Na criação do suporte da tocha a *laser*, utilizou-se o *software SolidWorks* 2023, disponível nos laboratórios do IFSC, aliado a uma impressora 3D de polímeros, a qual possibilitou a prototipagem rápida das peças projetadas.

O desenvolvimento do suporte foi baseado em um Trabalho de Conclusão de Curso elaborado por Leonardo José (2022), no qual foi projetado um acoplador de ferramentas compatível com o robô FANUC disponível no laboratório. A partir dos modelos e dados disponibilizados nesse trabalho, foi possível projetar um novo suporte que se encaixasse diretamente no acoplador, permitindo a transformação do robô em uma célula robotizada flexível, adaptável a diferentes aplicações de soldagem.

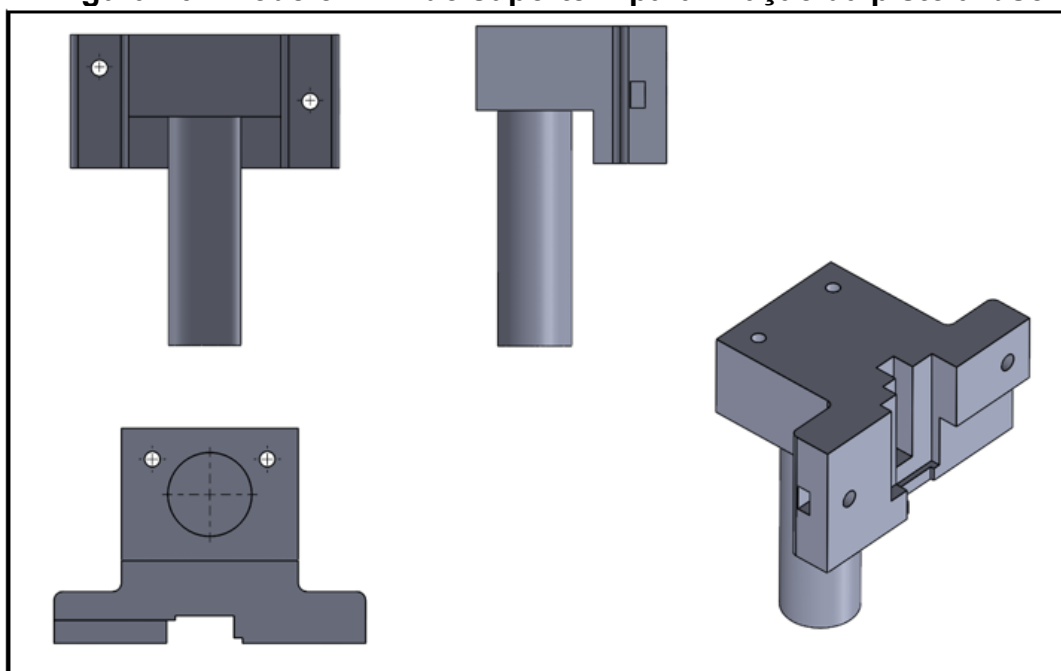
O processo de desenvolvimento consistiu, basicamente, em redesenhar as peças do acoplador de ferramentas, adaptando sua geometria para permitir a inserção do suporte da tocha a *laser*, sem comprometer a funcionalidade do mecanismo original de acoplamento.

O suporte foi projetado em duas partes:

- A primeira responsável pela conexão direta com o acoplador de ferramentas, garantindo estabilidade e compatibilidade com o sistema já existente;
- A segunda é destinada à fixação da tocha a *laser*, posicionando-a corretamente para realizar as operações de soldagem sem danificar a fibra óptica do *laser*.

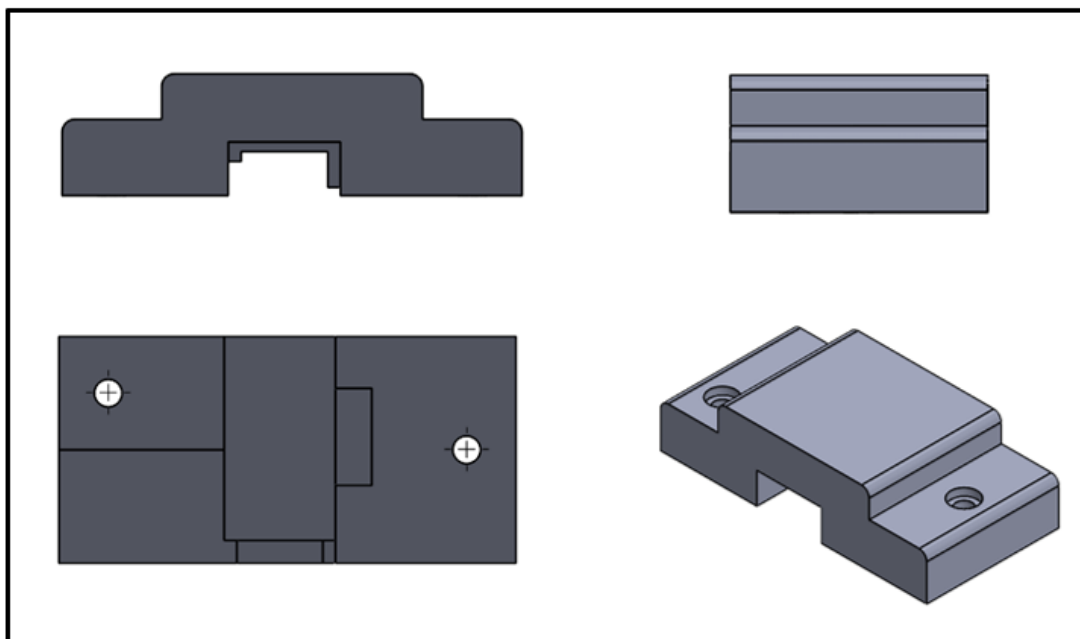
As Figuras 10 e 11 apresentam os modelos CAD desenvolvidos.

Figura 10 - Modelo CAD do suporte A para fixação da pistola *laser*



Fonte: Autoria própria (2025).

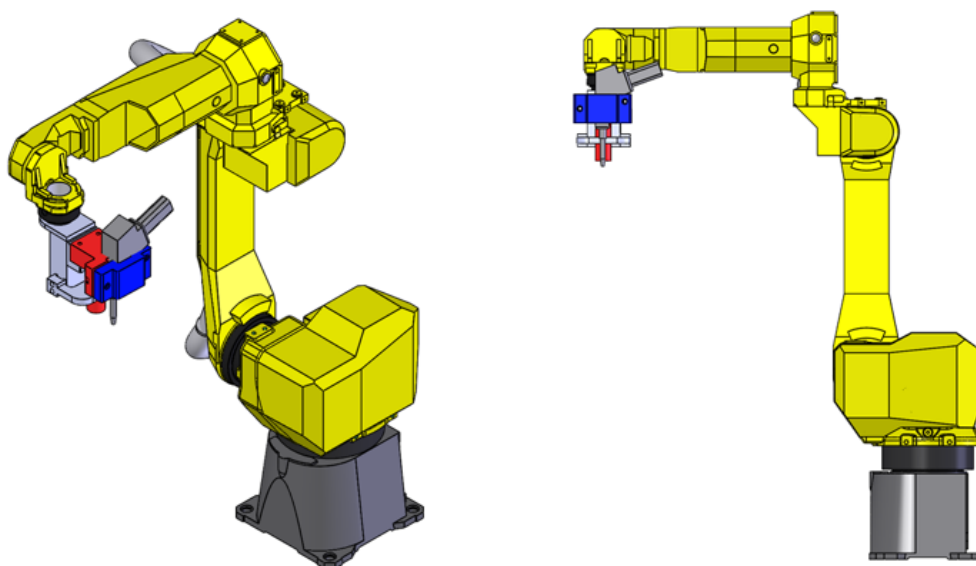
Figura 11 - Modelo CAD do suporte B para fixação da pistola *laser*



Fonte: Autoria própria (2025).

A Figura 12 apresenta o modelo tridimensional do robô FANUC com o suporte da tocha *laser* devidamente acoplado, permitindo observar a integração entre o acoplador de ferramentas original e o novo suporte desenvolvido.

Figura 12 - Imagem do robô FANUC com o suporte e tocha *laser* acoplado



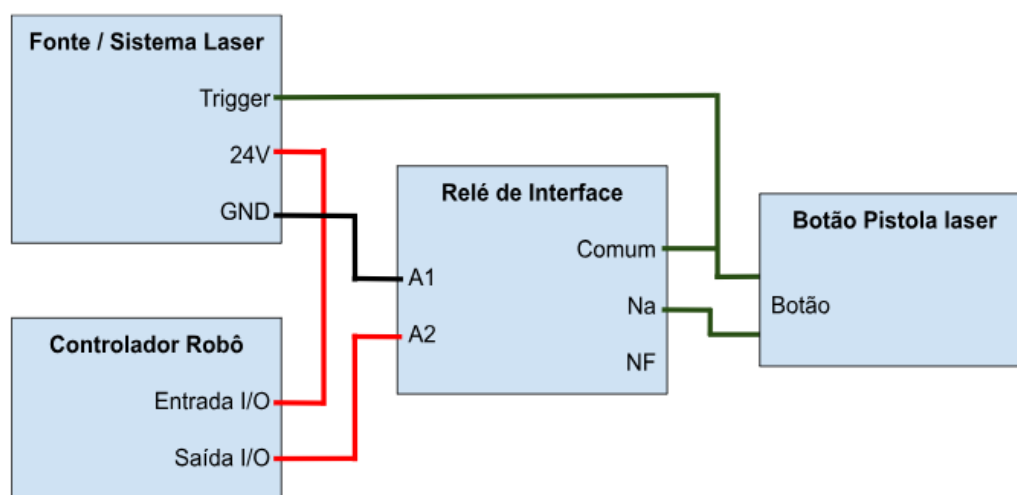
Fonte: Autoria própria (2025).

4.3. INTEGRAÇÃO DO SISTEMA LASER COM ROBÔ

Para que fosse possível realizar a soldagem a *laser* com o robô, foi preciso fazer a integração entre o sistema do *laser* e o sistema robótico. Criando uma interface que permitisse o controle sincronizado do acionamento do feixe *laser*.

Na prática, isso exigiu uma modificação no circuito da tocha *laser*. Foi feita uma antecipação dos fios do botão de disparo, de forma que o comando do feixe pudesse ser feito de duas maneiras: manualmente, usando o próprio botão da tocha, ou automaticamente, por meio de um sinal digital enviado pelo robô. Com isso, o sistema ganhou flexibilidade e permitiu a automação do processo sem perder a possibilidade de controle manual quando necessário. Figura 13 mostra como foi feita esta integração.

Figura 13 - Diagrama de Interligação dos Equipamentos



Fonte: Autoria própria (2025).

A solução adotada utilizou um relé de interface, que permitiu o controle da tocha por ambos os meios sem conflito de sinais. A ligação foi realizada da seguinte forma:

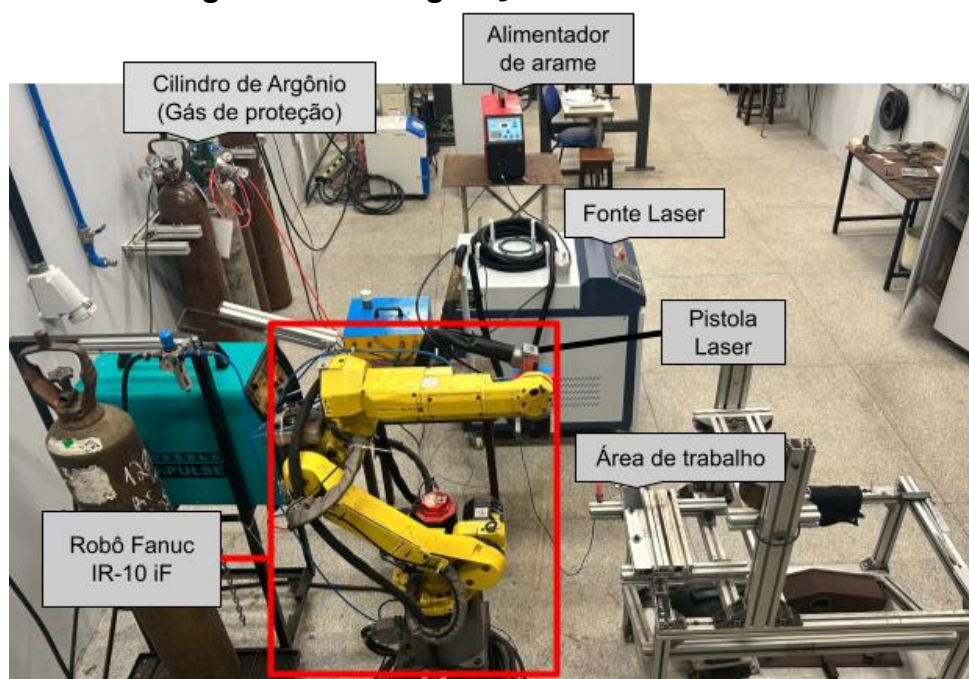
- Os fios provenientes do botão da tocha foram conectados às entradas 11 (comum) e 14 (normalmente aberta) do relé;
- A bobina do relé foi conectada nas entradas A1 e A2, sendo que:
 - A entrada A1 foi ligada ao GND (terra) do sistema do *laser*;
 - A entrada A2 foi ligada a uma saída digital (I/O) do robô, responsável por acionar a bobina do relé quando necessário.

Com essa configuração, o sistema permite que o *laser* seja ativado automaticamente pelo robô durante a execução dos programas de soldagem, ou manualmente, pelo operador, mantendo a flexibilidade de operação quando precisar utilizar o *laser* para outras finalidades.

4.4. MONTAGEM E CONFIGURAÇÃO DA CÉLULA ROBOTIZADA

Após a integração entre o sistema *laser* e o robô, procedeu-se à montagem completa da célula robotizada, conforme ilustrado na Figura 14. Com a estrutura física finalizada, iniciou-se a etapa de parametrização dos equipamentos, incluindo a configuração da fonte de *laser* e dos sistemas auxiliares, como o alimentador de arame e o controle de fluxo de gás, com o objetivo de preparar a célula para os testes de soldagem.

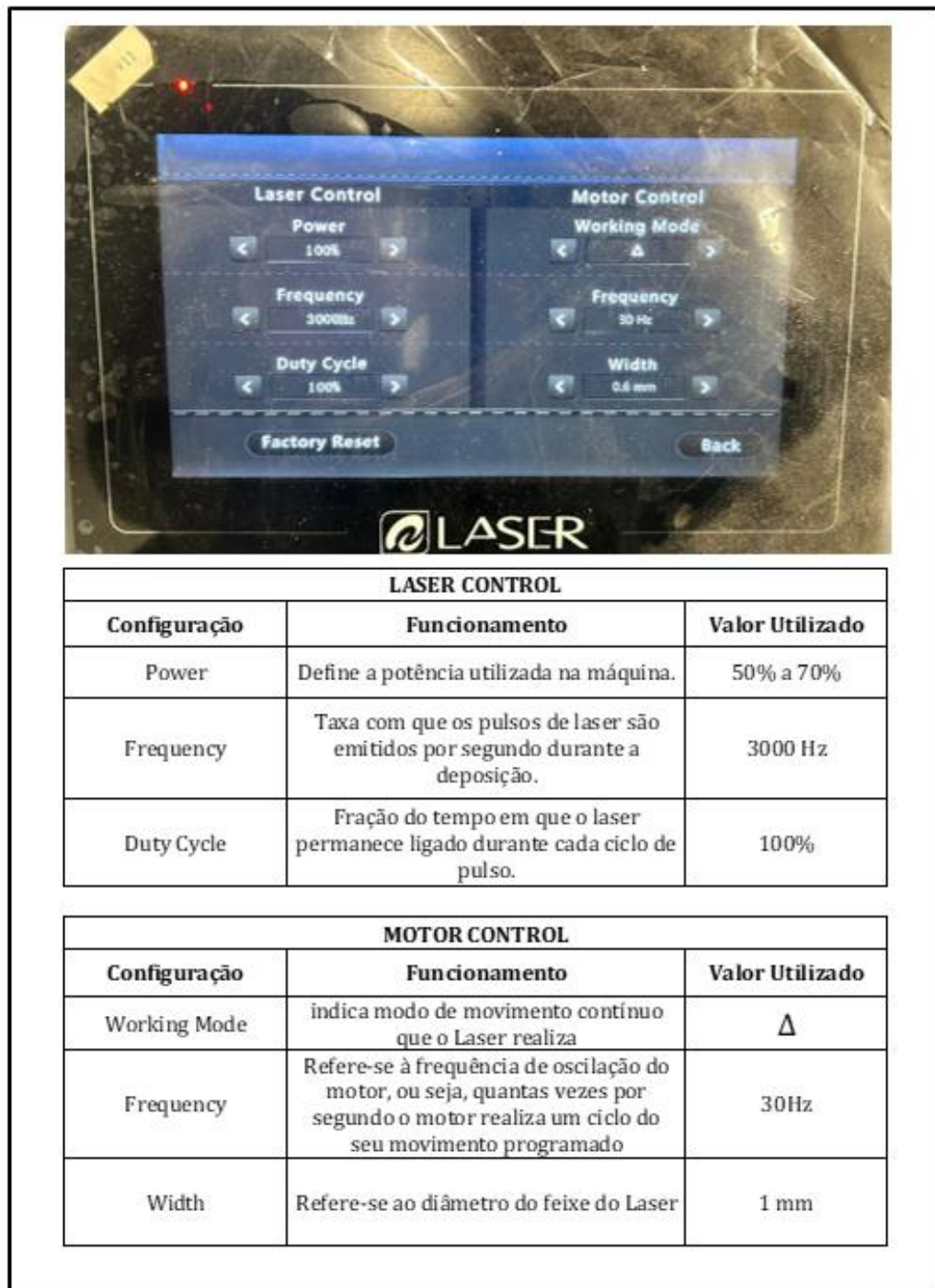
Figura 14 - Configuração da área de trabalho



Fonte: Autoria própria (2025).

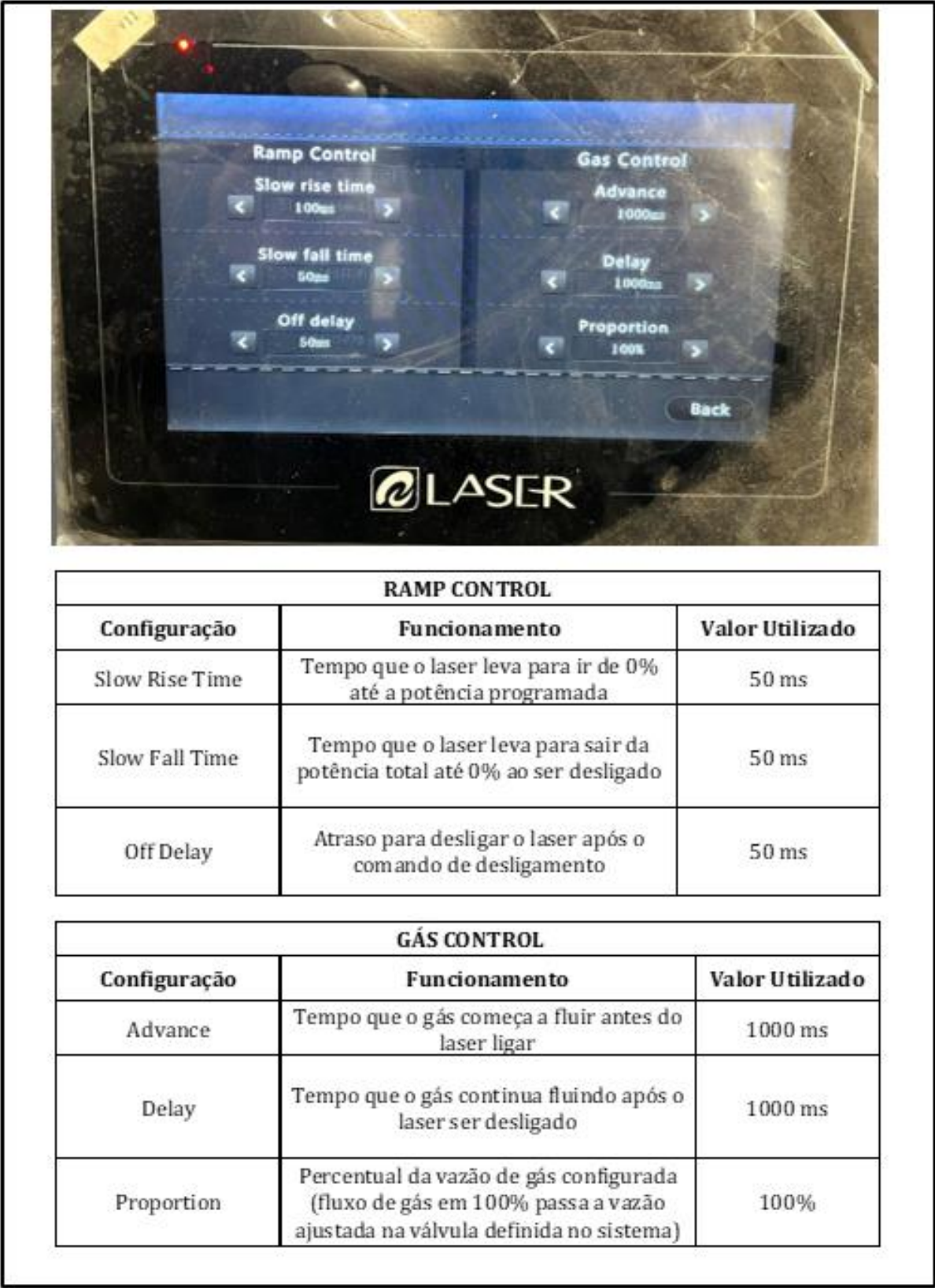
As Figuras 15, 16, 17 e 18 apresentam as interfaces utilizadas na configuração dos parâmetros operacionais. Nelas, foram ajustadas variáveis essenciais para o processo, como potência do *laser*, frequência, *duty cycle*, rampas de subida e descida do feixe, além dos controles de alimentação do arame e do fluxo de gás de proteção.

Figura 15 - Parâmetros de operação configurados no sistema de controle do laser e motor oscilatório



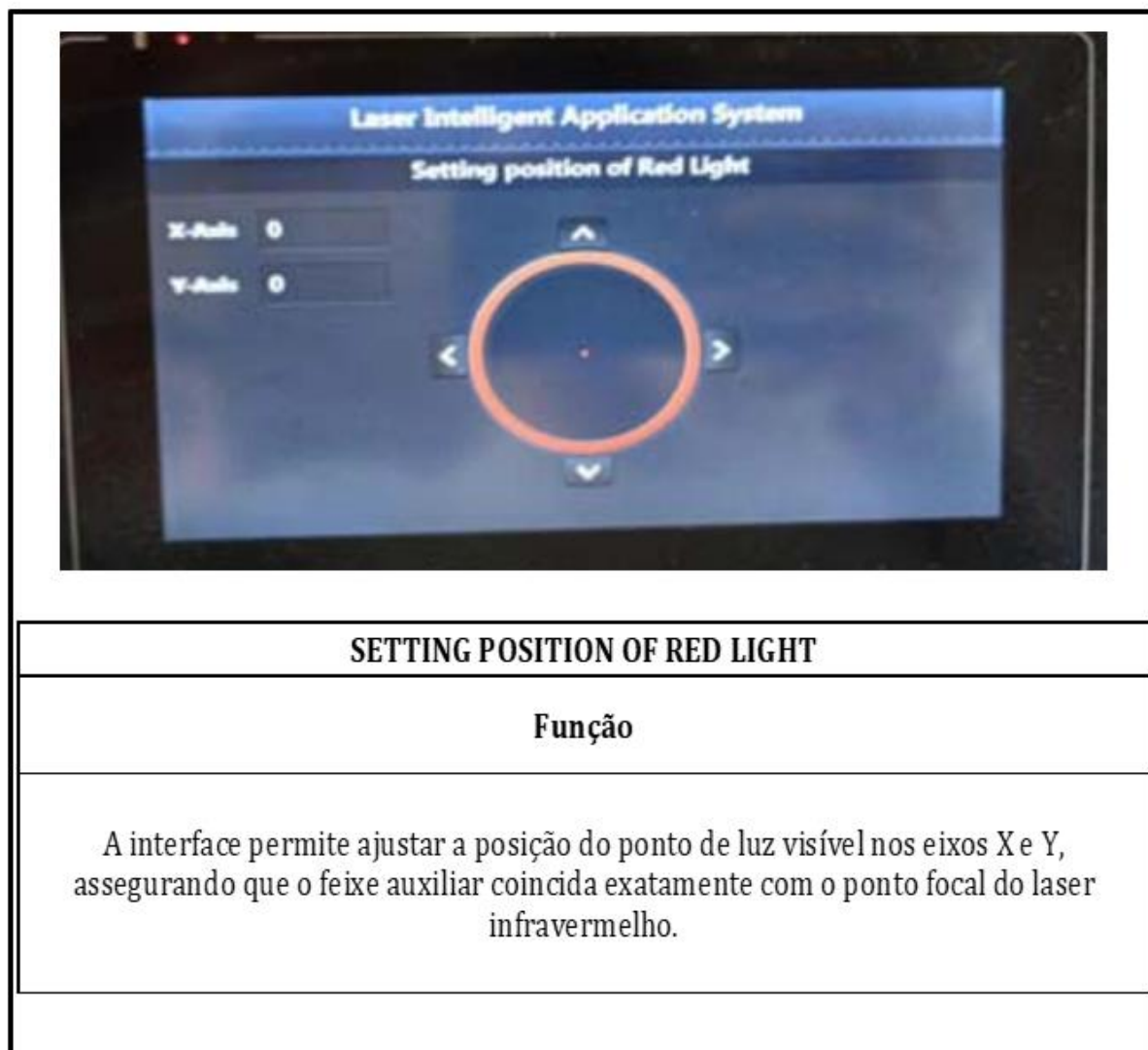
Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 16 - Parâmetros de rampa e controle de gás configurados no sistema do *laser*



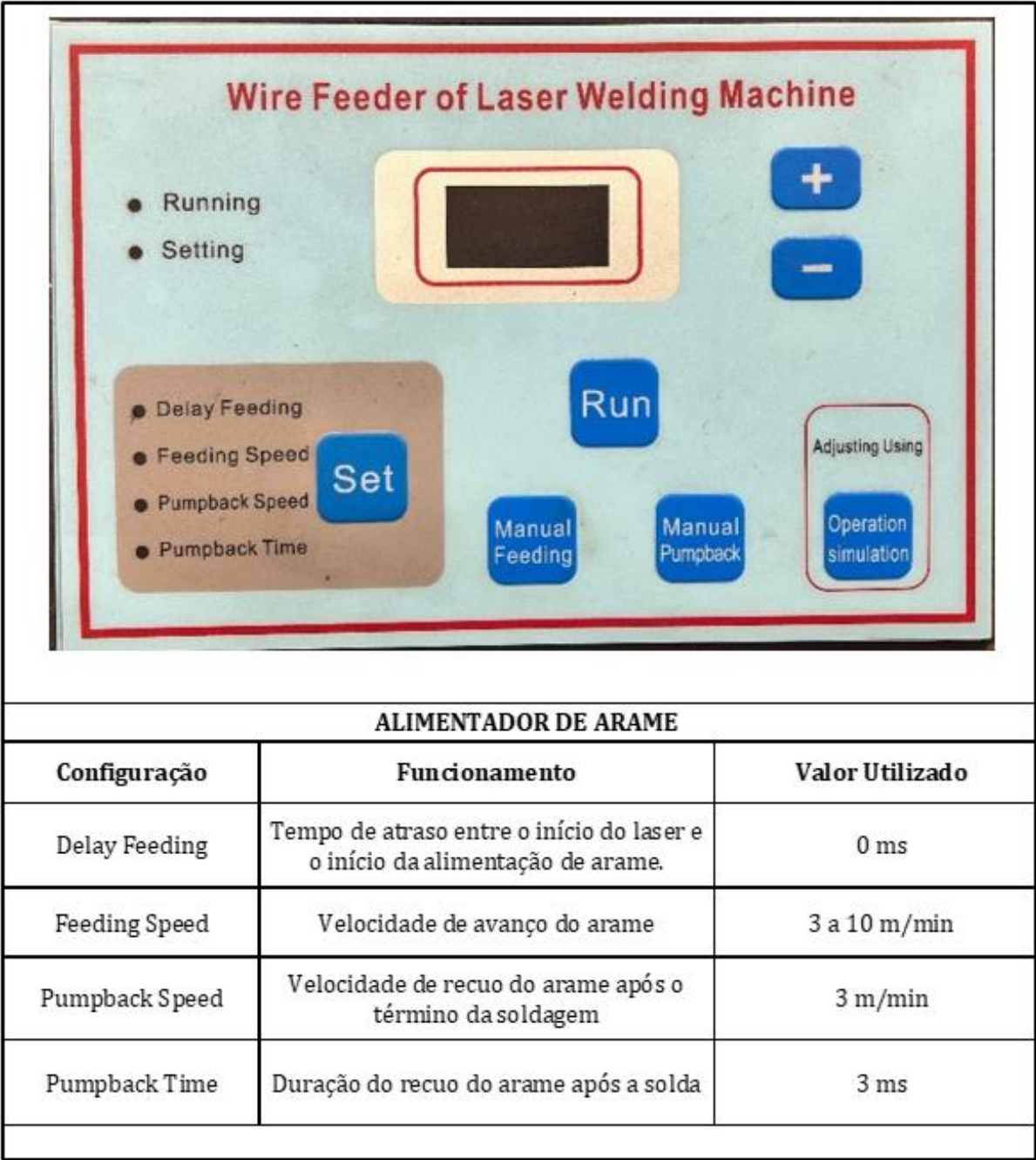
Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 17 - Interface de ajuste da posição do feixe de luz vermelha auxiliar



Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 18 - Interface e parâmetros configurados no alimentador de arame do sistema



4.5. CALIBRAÇÃO ÓPTICA DO LASER

Para determinar a distância focal ideal do *laser*, foi utilizado um método sistemático com parâmetros fixos: tempo de exposição de 1 ms e potência de 30% (450W) aplicados em uma chapa de alumínio. O deslocamento foi controlado pelo robô, que posiciona o bocal da pistola a uma distância inicial de 3 mm da chapa. Em seguida, a cada etapa, o bocal era elevado em incrementos de 3 mm, realizando uma marcação a cada novo ponto, Figura 19.

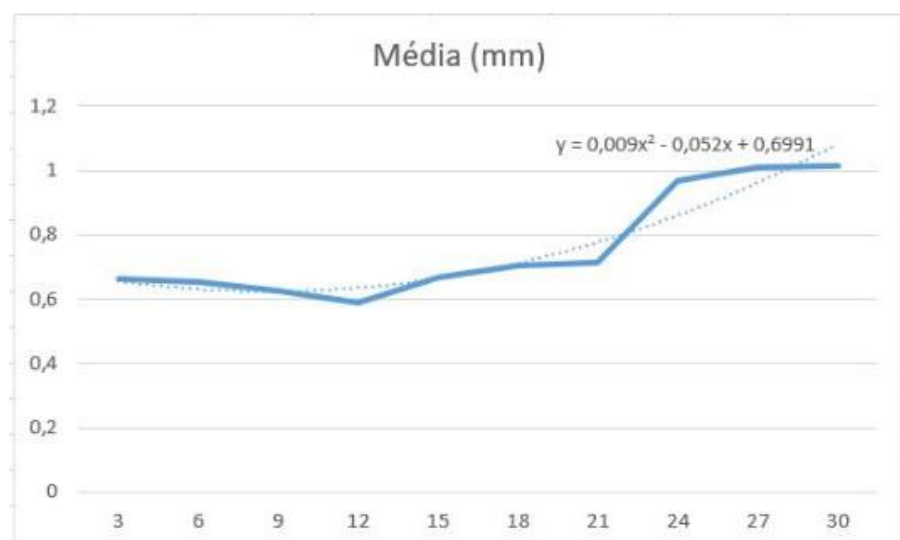
Figura 19 - Marcação dos pontos de impacto do feixe a diferentes distâncias para calibração óptica do *laser*



Fonte: Autoria própria (2025).

Após a conclusão das marcações, os diâmetros das marcações nos eixos X e Y foram medidos utilizando um projetor de perfil. Os dados resultantes foram analisados estatisticamente para calcular o diâmetro médio e avaliar a precisão e a uniformidade do foco em diferentes distâncias. Os resultados da análise são mostrados na Figura 20, como uma parábola, indicando que a distância focal ideal do *laser* é de 12 mm. Este método permite a determinação precisa da distância focal que irá proporcionar um melhor desempenho do feixe durante a soldagem.

Figura 20 - Variação do diâmetro médio do feixe *laser* em função da distância focal



Fonte: Autoria própria (2025).

4.6. PARÂMETROS DE SOLDAGEM

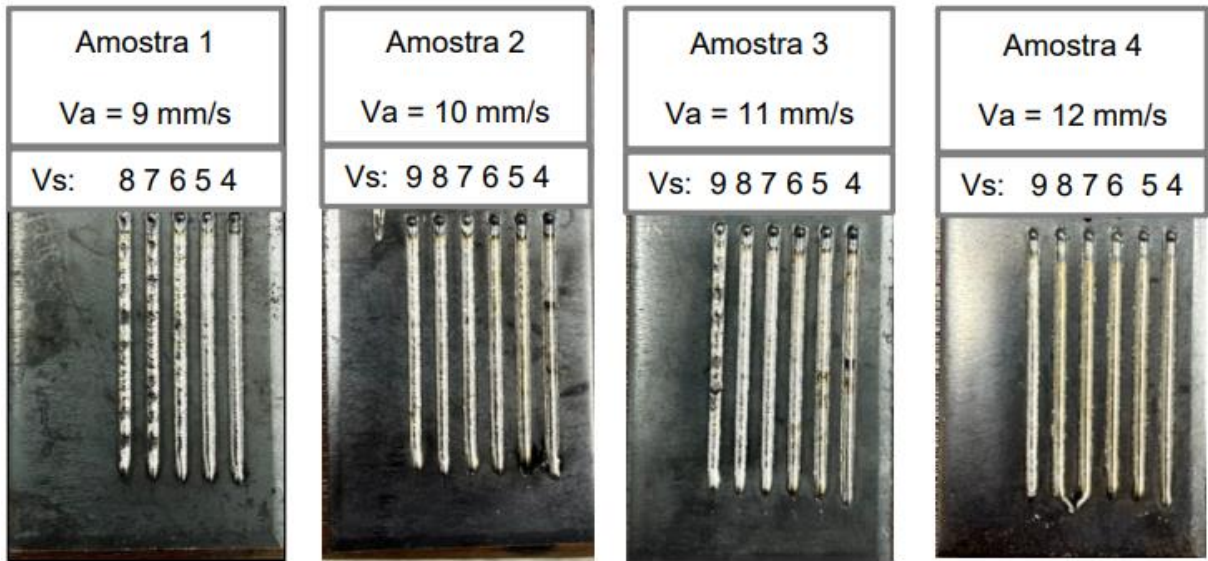
Para a definição dos parâmetros ideais do processo de soldagem, foram realizados testes variando algumas das condições operacionais descritas no tópico 3.5. Durante os ensaios, dois parâmetros foram mantidos constantes: a potência do *laser*, ajustada em 60% (equivalente a 900 W), e a vazão de gás de proteção, fixada em 10 L/min. Esses valores foram adotados com base em recomendações técnicas da literatura e em sua ampla utilização em aplicações com os materiais empregados neste projeto.

Os parâmetros variáveis testados foram:

- A velocidade de alimentação do arame (V_a), expressa em mm/s;
- A velocidade de deslocamento do robô (V_s), expressa em mm/s.

Para a execução dos testes, foi desenvolvido um programa específico no robô, responsável por depositar entre cinco e seis cordões de solda, com 50 mm de comprimento cada, aplicados sequencialmente sobre o substrato. A Figura 21 ilustra o resultado da deposição dos cordões.

Figura 21 - Cordões de solda obtidos com diferentes combinações de velocidades de alimentação do arame (V_a) e de soldagem (V_s)



Fonte: Autoria própria (2025).

Após a execução, as amostras foram cortadas com uma máquina de eletroerosão, permitindo a análise das macrografias das seções transversais. A Figura 22 apresenta as imagens obtidas, que serviram de base para a análise geométrica dos cordões de solda.

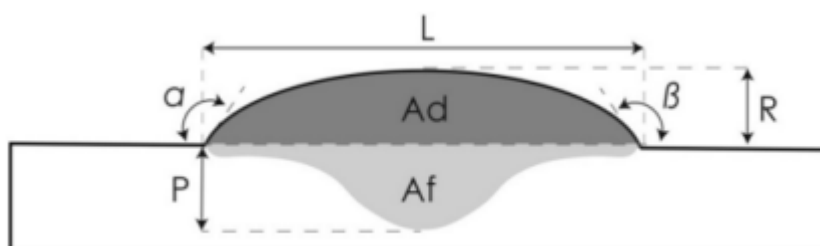
Figura 22 - Macrografias dos cordões de solda correspondentes às Amostras 1 a 4 após corte transversal



Fonte: Autoria própria (2025).

Para a realização das análises dos cordões foi utilizada a Figura 23 como base. A partir desses parâmetros geométricos, foi possível identificar os melhores cordões de cada amostra. As medições dos cordões foram feitas via *software*, seguindo os seguintes passos:

Figura 23 - Parâmetros geométricos do cordão de solda, onde: L: largura, R: reforço, P: penetração, Ad: área depositada, Af: área fundida, α e β : ângulos de borda do cordão



Fonte: Adaptado de Melo et al. (2012).

1. Aquisição da imagem com referência de escala:

Foi realizada uma foto do cordão depositado, utilizando um paquímetro posicionado junto à peça como referência dimensional. Garantindo a escala real da imagem.

2. Calibração da escala na imagem:

A partir da imagem obtida, foi identificada a equivalência entre a distância real (1 mm, medido no paquímetro) e sua representação na imagem. Essa proporção permitiu converter todas as medidas obtidas para valores reais em milímetros.

3. Análise dos cordões:

Com a escala calibrada, foram realizadas as medições dos parâmetros geométricos, conforme apresentado na Tabela 2.

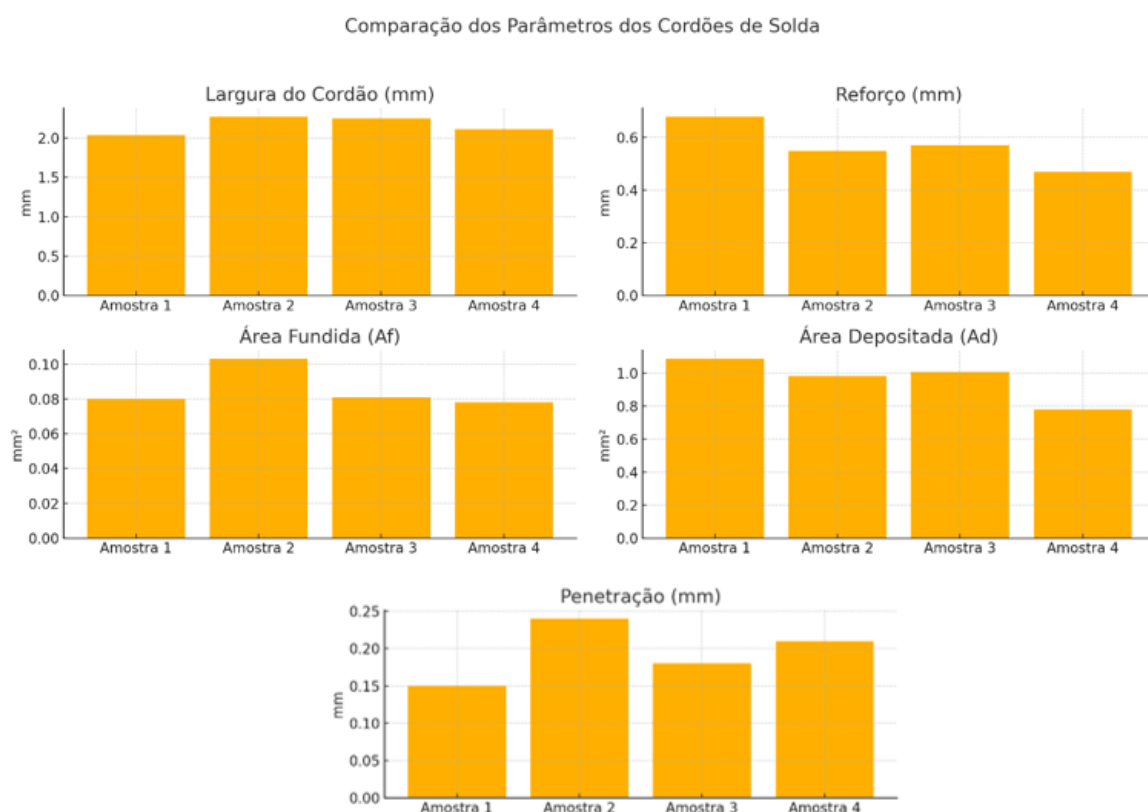
Tabela 2 - Comparativo dos melhores cordões de solda conforme variação de Va e Vs

CORDÃO	L (mm)	R(mm2)	Af (mm2)	Ad (mm2)	P (mm)
Amostra 1 (Va=9, Vs=4)	2,03	0,68	0,08	1,084	0,15
Amostra 2 (Va=10, Vs=4)	2,27	0,55	0,103	0,981	0,24
Amostra 3 (Va=11, Vs=5)	2,25	0,57	0,081	1,007	0,18
Amostra 4 (Va=12, Vs=4)	2,11	0,47	0,078	0,778	0,21

Fonte: Autoria própria (2025).

Dentre as quatro melhores amostras, a Amostra 2 ($V_a = 10$ mm/s, $V_s = 4$ mm/s) apresentou o melhor desempenho. Ela teve a maior largura de cordão (2,27 mm) e a maior penetração (0,24 mm), indicando equilíbrio entre fusão e deposição. O reforço moderado (0,55 mm) e a relação entre A_f e A_d mostram bom aproveitamento térmico. A Figura 24 ilustra claramente esses resultados.

Figura 24 - Comparação dos parâmetros dos cordões de solda



Fonte: Autoria própria (2025).

A fim de validar a estabilidade do processo, foi realizada uma nova deposição com os mesmos parâmetros ($V_a = 10$ mm/s, $V_s = 4$ mm/s). A Figura 25 mostra a macrografia do novo cordão obtido, que apresentou características semelhantes à deposição anterior. Essa repetibilidade confirma a consistência do processo, permitindo a sua adoção para as etapas seguintes do projeto.

Figura 25 - Macrografia do cordão de solda correspondente aos parâmetros ($V_a = 10$ mm/s, $V_s = 4$ mm/s)



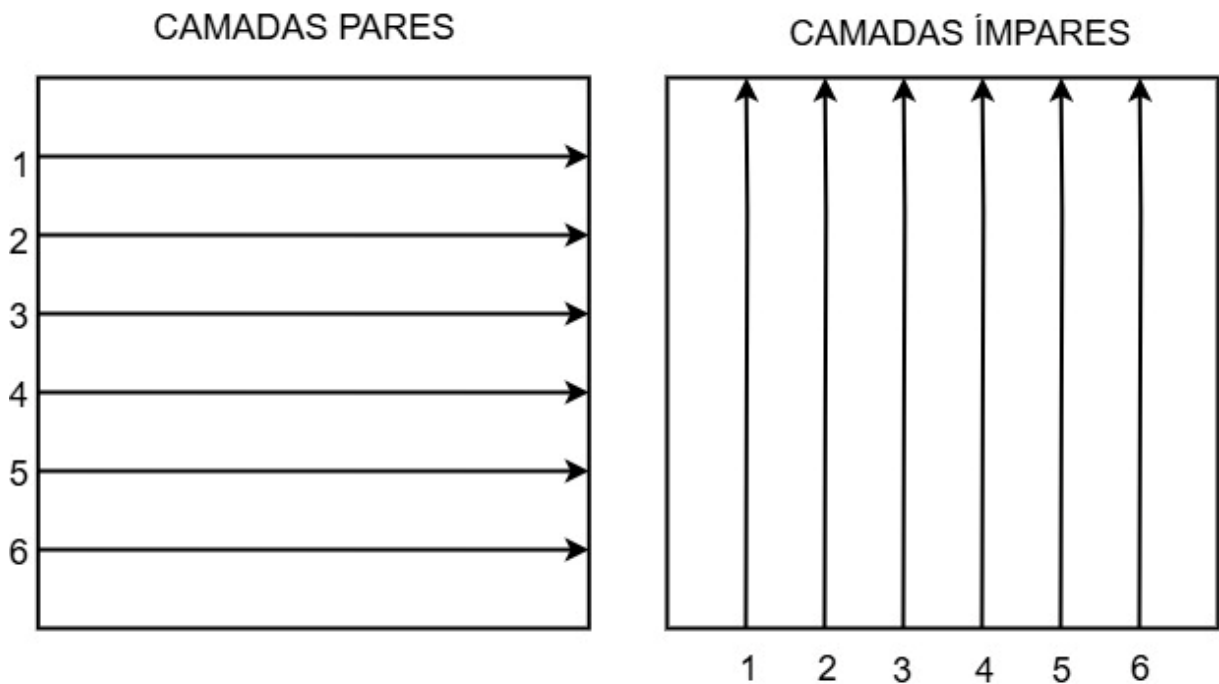
Fonte: Autoria própria (2025).

4.7. MÉTODOS DE DEPOSIÇÃO DE CAMADAS

Devido às limitações impostas pela fibra óptica e à posição relativa entre o arame de adição e a tocha *laser*, a célula foi configurada para operar em apenas duas orientações durante o processo de deposição. Como ilustrado na Figura 26, essa restrição está relacionada ao fato de que a soldagem com adição de arame só é possível quando o movimento ocorre no sentido de “puxar” a tocha, o que assegura a correta alimentação do material de adição. Essa condição é abordada no Tópico 3.4, onde é indicada a direção de movimento necessária para a realização da soldagem.

Cada camada será composta por seis cordões de solda, utilizando os melhores parâmetros de soldagem encontrado anteriormente.

Figura 26 - Estratégia de deposição adotada para controle térmico e estabilidade dimensional entre camadas pares e ímpares

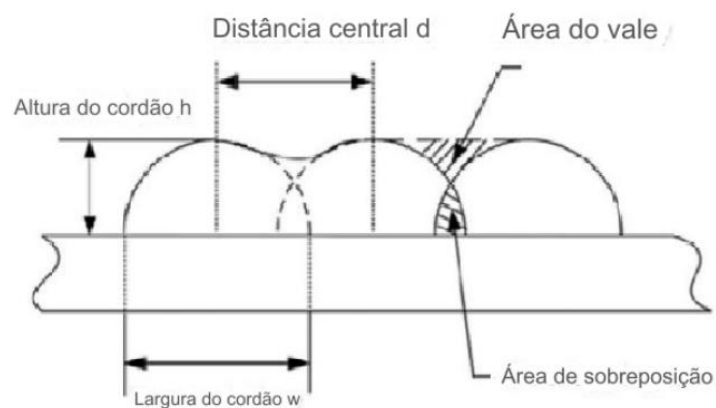


Fonte: Autoria própria (2025).

4.7.1. Definição sobreposição das camadas

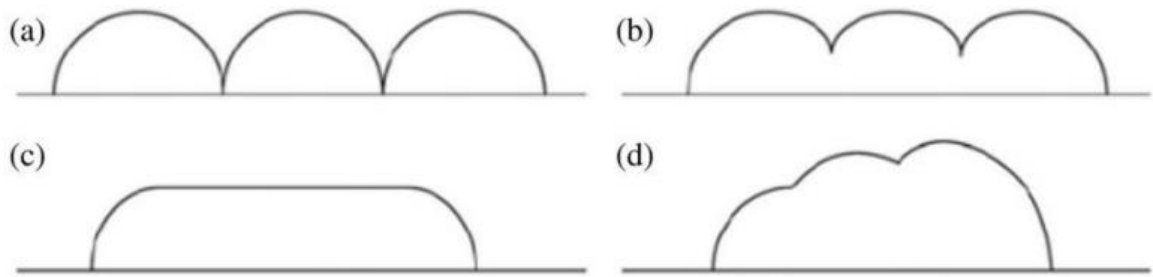
Para definir a sobreposição ideal entre os cordões, utilizou-se a Figura 27 como referência, aplicando os parâmetros obtidos na etapa anterior. O objetivo é alcançar a condição representada pela letra C da figura 28, que demonstra uma sobreposição ideal entre os cordões depositados.

Figura 27 - Esquemático tradicional do modelo de sobreposição



Fonte: adaptada de Ding et al. (2015).

Figura 28 - Padrões de distância entre centros diferentes d (distância central)



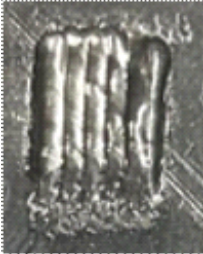
Fonte: Ding et al. (2015).

Para isso, foram realizados testes práticos variando a distância entre cordões, com base na Equação 5:

$$\text{Sobreposição} = \text{largura do cordão} - d \quad [5]$$

Considerando uma largura média de cordão de 2,27 mm, foram realizados testes com diferentes valores de d (distância central), ajustando a porcentagem de sobreposição. Esses testes são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Avaliação da qualidade das camadas em função da taxa de sobreposição

Sobreposição (%)	Valor (mm)	Resultado
28	0,6356	
29	0,6583	
30	0,681	
31	0,7037	
32	0,7264	
33	0,7491	
34	0,7718	

Fonte: Autoria própria (2025).

Após a realização das deposições, foi feita a análise das camadas formadas, considerando tanto o aspecto visual quanto as dimensões geométricas de cada uma. A camada com sobreposição de 30% apresentou o melhor acabamento superficial e as melhores dimensões. Por esse motivo, foi selecionada para corte e posterior avaliação macrográfica, conforme apresentado na Figura 29. O objetivo dessa análise foi verificar se, além da boa aparência, a camada apresentava uma estrutura adequada, com fusão eficiente entre os cordões e ausência de descontinuidade, como porosidade ou falta de penetração.

Figura 29 - Camada depositada com 30% de sobreposição, ($V_a = 10$ mm/s, $V_s = 4$ mm/s)



Fonte: Autoria própria (2025).

Como a camada não apresentou descontinuidades — sem presença de porosidade — considerou-se concluída a fase de calibração da célula de soldagem. Dessa forma, foi possível avançar para a etapa de validação do sistema.

4.8. PROGRAMAÇÃO DO ROBÔ

Antes de começar a programar o robô, é importante configurar dois elementos básicos: o TCP (*Tool Center Point*) da ferramenta e o *User Frame*, que serve como referência para o plano de operação. Essa configuração é essencial para que o robô consiga se movimentar com precisão e posicione a tocha *laser* corretamente durante a deposição do material.

No caso do TCP, o que se faz é indicar para o robô exatamente onde está a ponta da ferramenta - neste caso, a saída do feixe de laser em relação à flange do braço robótico. Isso garante que os movimentos sejam realizados com base no ponto certo da ferramenta, evitando erros de posicionamento. Para isso, foi utilizado o método dos seis pontos, disponível no sistema de controle do robô FANUC. Esse procedimento consiste em posicionar a ponta da ferramenta sempre sobre o mesmo ponto fixo no espaço, porém com diferentes orientações do robô, permitindo que o sistema calcule com precisão a posição do centro da ferramenta.

Após a configuração do TCP, foi definido o *User Frame*, que corresponde ao sistema de coordenadas no qual a célula irá operar. Esse frame foi criado a partir da seleção de três pontos sobre a superfície da mesa de deposição, sendo dois deles utilizados para definir o eixo X e o terceiro para determinar o eixo Y. Com isso, é possível estabelecer corretamente a orientação do plano de trabalho e garantir que o eixo Z representasse a direção vertical do processo.

Com o TCP e o *User Frame* devidamente configurados, foi iniciado o processo de programação diretamente na interface do robô, criando pontos de forma manual e criando um programa subsequente para realização da geometria desejada.

A programação do robô FANUC, assim como de outros sistemas robóticos industriais, é baseada em pontos predefinidos no espaço. Para a realização do programa de cada camada da torre de validação, foi utilizado cinco pontos principais:

1. Ponto Home: posição inicial segura do robô.
2. Ponto de Aproximação: posição próxima ao início do cordão, sem contato com o substrato.
3. Ponto de Contato (Início): início do cordão de solda.

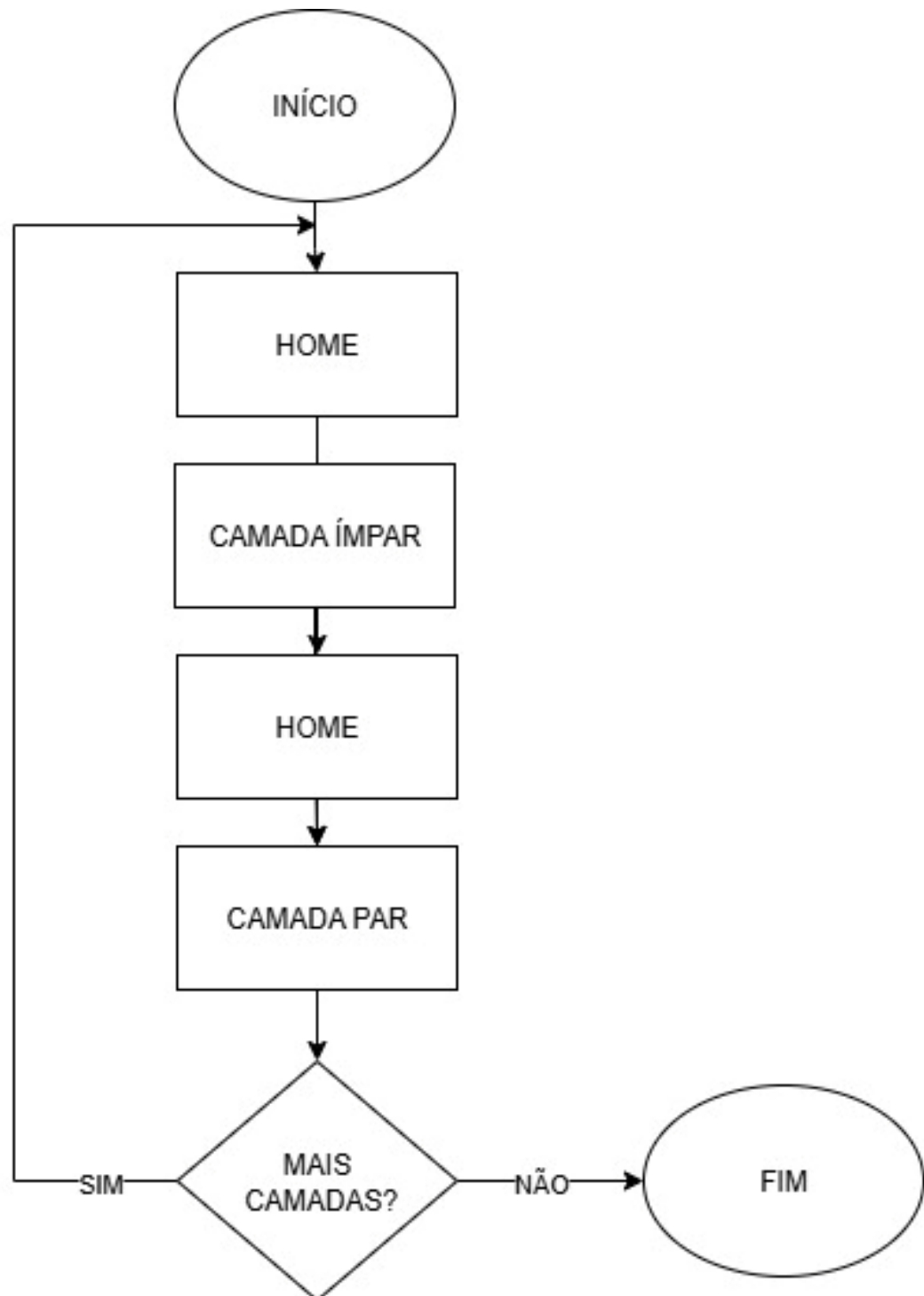
4. Ponto Final (Fim): término do cordão.
5. Ponto de Retração: ponto para recuo da tocha após finalizado o cordão, afastando-a do substrato.

A construção de cada camada é realizada por meio da repetição do programa responsável pela deposição de um único cordão, utilizando uma estrutura de repetição (*loop*). Um comando condicional (IF) verifica se o número desejado de cordões já foi atingido. Para implementar a repetição, utiliza-se a função *JUMP* associada a um *LABEL*, que redireciona o fluxo do programa para o início da sequência de deposição, reiniciando o ciclo até que o critério seja satisfeito.

Após a finalização de cada camada, o robô retorna automaticamente ao ponto *home*. Somente após alcançar essa posição de segurança, o sistema prossegue com a próxima camada, elevando a coordenada Z em 0,5 mm, posicionando assim a tocha *laser* exatamente acima da camada anterior. Essa movimentação vertical é possível devido à configuração que foi feita anteriormente do *user frame* de usuário no robô FANUC, no qual o eixo Z foi definido como a direção vertical do processo.

Para a construção da peça, foram programadas duas variações de camada, conforme descrito no Tópico 4.7. A primeira variação corresponde às camadas ímpares, com os cordões de solda orientados no eixo X. Já a segunda corresponde às camadas pares, nas quais os cordões foram dispostos na direção Y. Esses dois programas são integrados em um *loop* adicional, o qual alterna entre as direções de deposição a cada nova camada e repete o processo até atingir o número total de camadas estipulado para a peça. Durante essa etapa, é mantido um contador de camadas, que é incrementado a cada iteração do *loop* principal. Figura 30 mostra como será o funcionamento do robô.

Figura 30 - Fluxograma funcionamento do robô



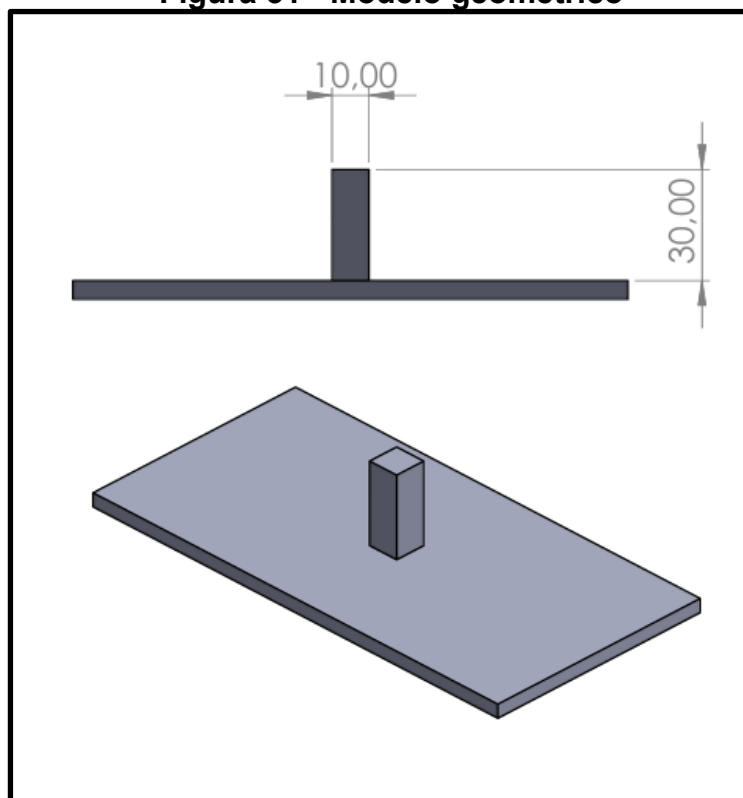
Fonte: Autoria Própria (2025).

4.9. VALIDAÇÃO DA CÉLULA ROBÓTICA PARA WLAM

Após a conclusão das etapas de montagem, integração dos equipamentos e programação do sistema, procede-se à validação funcional da célula robotizada desenvolvida para o processo de manufatura aditiva a laser com adição de arame (WLAM). Essa validação tem como objetivo comprovar a capacidade do sistema em realizar a deposição de material metálico de forma automatizada, assegurando a coordenação entre o robô, a fonte de laser, o alimentador de arame e o sistema de proteção gasosa.

Para tal, foi proposta a construção de uma torre metálica de base quadrada com dimensões de 10 mm × 10 mm e altura de 30 mm, conforme orientação do Prof. Dr. Eng. Erwin Werner Teichmann, apresentada na Figura 31. A escolha dessa geometria simples e simétrica se justifica por sua ampla utilização como peça de teste-padrão (*benchmark geometry*) em processos de manufatura aditiva, uma vez que permite avaliar a repetibilidade do processo de deposição em múltiplas camadas e verificar a estabilidade operacional da célula ao longo do tempo.

Figura 31 - Modelo geométrico



Fonte: Autoria Própria (2025).

Para a fabricação da torre, foram aplicados os parâmetros previamente definidos na etapa de calibração do processo, com deposições realizadas em camadas sucessivas. A elevação gradual da tocha foi realizada conforme o espaçamento vertical estabelecido, mantendo-se também a alimentação contínua de arame e o fluxo constante de gás de proteção, de acordo com o planejamento técnico.

A validação descrita neste capítulo permitiu demonstrar a viabilidade funcional da célula robotizada, fornecendo a base necessária para a análise dos resultados obtidos, os quais serão discutidos no capítulo seguinte.

5. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Para compreender as contribuições obtidas com a pesquisa e o resultado do desenvolvimento da célula robotizada, em Análise e Discussão dos Resultados são revistos os Objetivos Gerais, Específicos e se estes foram atendidos. Este capítulo também discute se o produto satisfaz aos requisitos propostos durante a idealização do projeto.

Como mostrado nas Figuras 31 e 32, o objetivo geral de projetar e implementar uma célula robotizada que integrasse uma fonte de *laser* e o robô FANUC M10iA foi alcançado.

Figura 32 - Visão geral da célula robotizada montada para o processo WLAM



Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 33 - Célula robotizada montada para o processo WLAM

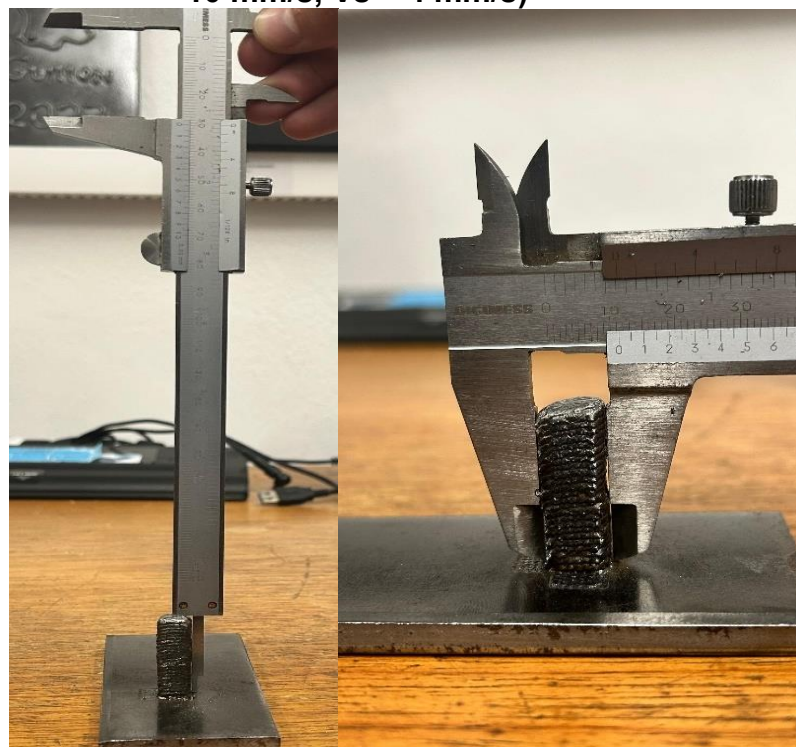


Fonte: Autoria própria (2025).

Os objetivos específicos propostos também foram executados com êxito, conforme descrito a seguir:

- Foi projetado e fabricado um suporte para fixação da pistola de *laser* e do arame de adição, compatível com a garra do robô FANUC M10iA;
- A integração entre o sistema de controle do robô e a máquina de *laser* foi realizada, permitindo o acionamento automatizado do feixe;
- Foram configurados todos os componentes do sistema, incluindo o alimentador de arame, controle de gás e parâmetros do *laser*;
- A calibração óptica do *laser* foi feita utilizando marcações progressivas para determinação da distância focal ideal;
- Os parâmetros de soldagem foram definidos com base em testes experimentais variando as velocidades de alimentação e deslocamento;
- As trajetórias do robô foram programadas para realizar os cordões de deposição em camadas sucessivas;
- Foram executados testes práticos de deposição e os resultados foram analisados e registrados;
- Um protótipo metálico foi construído com base nos parâmetros ideais obtidos, validando o funcionamento da célula robotizada, Figura 34.

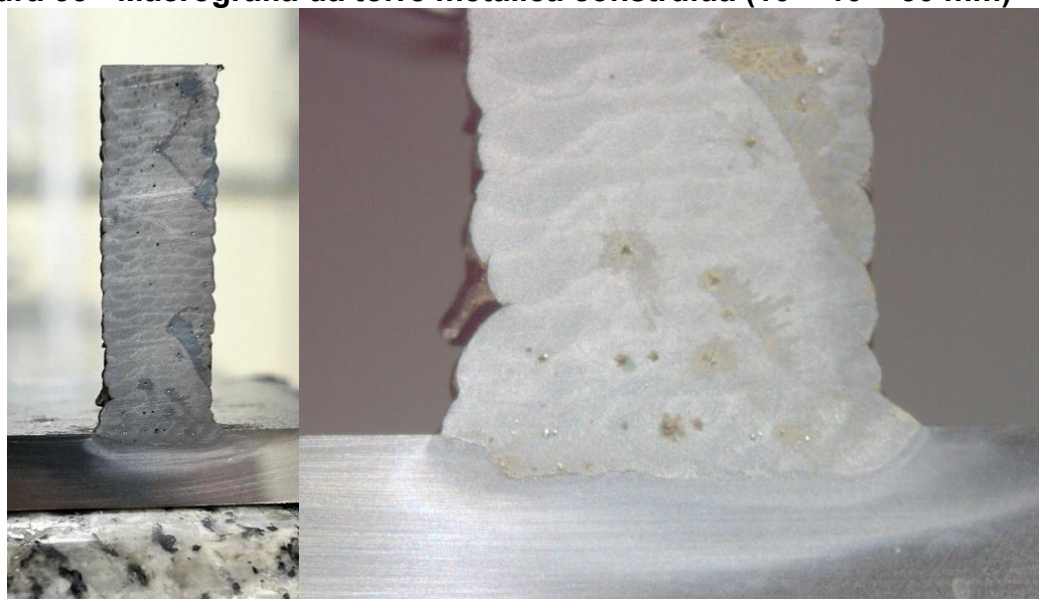
Figura 34 - Protótipo construído para validação da célula robótica ($V_a = 10 \text{ mm/s}$, $V_s = 4 \text{ mm/s}$)



Fonte: Autoria Própria (2025).

Após a construção da torre, foram observadas porosidades entre as camadas depositadas, como evidenciado na Figura 35. Esse tipo de descontinuidade conforme a norma NBR ISO 5817 compromete a integridade da peça, indicando possíveis falhas na fusão ou na proteção gasosa durante o processo.

Figura 35 - Macrografia da torre metálica construída (10 × 10 × 30 mm)



Fonte: Autoria própria (2025).

Apesar dessas descontinuidades, a construção da torre confirmou o funcionamento integrado dos subsistemas, validando a operação da célula robótica dentro do escopo proposto. A comparação entre a peça fabricada e o modelo CAD demonstrou conformidade satisfatória, evidenciando a capacidade do sistema em reproduzir geometrias simples para aplicações em manufatura aditiva metálica com adição de arame.

Ainda assim, o conceito da célula foi validado, demonstrando que o sistema funciona conforme o planejado e integra corretamente todos os subsistemas. Considerando que o objetivo principal deste trabalho é o desenvolvimento da célula e não o refinamento dos parâmetros de soldagem, optou-se por prosseguir com a finalização do projeto. A otimização desses parâmetros demandaria tempo adicional significativo e extrapolaria o escopo do estudo, mas não compromete a análise do desempenho funcional da célula.

Antes da finalização, entretanto, foram realizados estudos técnicos para identificar as possíveis causas das discontinuidades observadas. Diante disso, foi feito levantamento de hipóteses para explicar a ocorrência das discontinuidades na peça, visando orientar para obtenção de melhorias na qualidade final das peças produzidas. As principais causas consideradas foram:

- Insuficiência ou má distribuição do gás de proteção;
- Parâmetros de laser mal ajustados (potência ou velocidade);
- Posicionamento incorreto do arame em relação ao ponto focal do laser;
- Acúmulo de contaminações na superfície do substrato.

Considerando que o sistema de gás é integrado à pistola de laser, a hipótese de má distribuição do fluxo foi descartada, restando como provável a necessidade de ajuste na vazão. A recomendação é que sejam realizados testes variando esse parâmetro para avaliar sua influência na formação de porosidades.

A posição do arame em relação ao feixe também foi analisada, mas, devido à capacidade da interface do equipamento em controlar precisamente o ponto de incidência do laser, essa causa foi considerada pouco provável. Já no que se refere à condição do substrato, destaca-se a importância do preparo da superfície antes da deposição. Para reduzir esse fator de risco, recomenda-se a realização de limpeza mecânica (lixamento) como etapa padrão de preparação.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Mesmo que a célula robotizada desenvolvida ainda apresente algumas limitações, isso não compromete sua aplicação prática. Em certos pontos, ajustes nos parâmetros ainda são necessários para alcançar a qualidade ideal das peças, mas o sistema já demonstrou capacidade de execução consistente do processo WLAM, com estabilidade no cordão de deposição e operação satisfatória dos subsistemas automatizados.

Esses resultados comprovam que a solução proposta é tecnicamente viável e atende aos requisitos de uma célula robotizada para WLAM, servindo como referência para futuras melhorias, principalmente relacionadas à qualidade das camadas depositadas.

6.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para continuar melhorando a célula robotizada, uma das recomendações é revisar e ajustar melhor os parâmetros de soldagem. O objetivo seria garantir um controle mais preciso da qualidade das peças, principalmente no que diz respeito à integridade das camadas que vão sendo depositadas.

Outra sugestão interessante seria adicionar uma mesa rotativa ao sistema. Com esse recurso, o conjunto ganharia mais graus de liberdade, o que permitiria realizar a deposição em diferentes ângulos e produzir peças com formas mais complexas. Isso tornaria a célula mais flexível e preparada para atender demandas industriais mais sofisticadas, aproximando o projeto de aplicações reais na área de manufatura aditiva.

REFERÊNCIAS

GIBSON, I.; ROSEN, D.; STUCKER, B.; KHORASANI, M. **Additive Manufacturing Technologies**. 3. ed. 2021.

DING, Y.; AKBARI, M.; GAO, X.-L.; AI, L.; KOVACEVIC, R. **Use of a robotized laser powder-feed metal additive manufacturing system for fabricating metallic metamaterials**, 2018. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/324150920_Use_of_a_Robotized_Laser_PowderFeed_Metal_Additive_Manufacturing_System_for_Fabricating_Metallic_Meta_materials>. Acesso em: 23 mar. 2025.

CASALINO, G.; KARAMIMOGHADAM, M.; CONTUZZI, N. **Metal Wire Additive Manufacturing: A Comparison between Arc Laser and Laser/Arc Heat Sources**. 2023. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2411-5134/8/2/52>>. Acesso em: 30 abr. 2025.

GROOVER, M. P. **Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes, and systems**. 4. ed. 2010. Disponível em: <<https://tusharaneyrao.files.wordpress.com/2019/12/fundamentals-of-modern-manufacturing-materials-processes-and-systems.pdf>>. Acesso em: 18 mar. 2025.

KALPAKJIAN, S.; SCHMID, S. R. **Manufacturing processes for engineering materials**. 6. ed. 2008. Disponível em: <[https://lib.zu.edu.pk/ebookdata/Engineering/Energy%20System/Manufacturing%20Engineering%20and%20Technology%20by%20Serope%20Kalpakjian%2C%20Steve n%20R.%20Schmid%20.pdf](https://lib.zu.edu.pk/ebookdata/Engineering/Energy%20System/Manufacturing%20Engineering%20and%20Technology%20by%20Serope%20Kalpakjian%2C%20Steven%20R.%20Schmid%20.pdf)>. Acesso em: 25 abr. 2025.

FERNANDES, T. K. S.; RODRIGUES, L. F. A.; SILVA, M. M.; SANTANA, R. A. C. **Aplicação da automação nos processos de soldagem: uma introdução**. 2022. Disponível em: <https://editorarealize.com.br/editora/anais/conapesc/2022/TRABALHO_EV177_MD_1_ID315_TB796_24062022234631.pdf>. Acesso em: 17 maio. 2025.

SILVA, R. G. N. **Desenvolvimento e avaliação do processo de soldagem híbrida laser-gmaw (hlaw): um avanço na consolidação de processos de soldagem de alta penetração**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2020.

BARBETTA, L. D. **Application of the High-Current Spray Transfer Buried Arc in Hybrid Laser-Arc Welding**. 2019. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019.

POPRAWA, R. **Tailored Light 2: Laser Application Technology**. 1. ed. Berlin: Springer, 2011.

NADZAM, J. (Ed.). **GMAW Welding Guide, Gas Metal Arc Welding: Carbon, Low Alloy, and Stainless Steel and Aluminium**. Cleveland, OH: Lincoln Electric, 2006.

NGO, T. D.; KASHANI, A.; IMBALZANO, G.; NGUYEN, K. T. Q.; HUI, D. **Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. Composites Part B: Engineering**, v. 143, p. 172–196, 2018. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359836817342944>>. Acesso em: 13 abr. 2025.

DING, D.; PAN, Z.; CUIURI, D.; LI, H. **Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 81, n. 1, p. 465–481, 2015. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-015-7077-3>>. Acesso em: 14 abr. 2025.

ABUABIAH, M.; MBODJ, N. G.; SHAQOUR, B.; HERZALLAH, L.; JUAIDI, A.; ABDALLAH, R.; PLAPPER, P. **Advancements in Laser Wire Feed Metal Additive Manufacturing: A Brief Review. Materials**, v. 16, n. 5, art. 2030, 2023. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1996-1944/16/5/2030>>. Acesso em: 30 abr. 2025.

DING, Y.; AKBARI, M.; KOVACEVIC, R. **Process planning for laser wire feed metal additive manufacturing system. International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 95, p. 355–365, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00170-017-1179-z>>. Acesso em: 26 abr. 2025.

TEBIANIANIAN, M.; AGHAIE, S.; RAZAVI JAFARI, N. S.; FARBAKHTI, M.; HUO, Y. **A review on the metal additive manufacturing processes. Materials**, v. 16, n. 24, art. 7514, 2023. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1996-1944/16/24/7514>>. Acesso em: 27 abr. 2025.

TEICHMANN, E. W.; KELBASSA, J.; GASSER, A.; TARNER, S.; SCHLEIFENBAUM, J. H. **Effect of wire feeder force control on laser metal deposition process using coaxial laser head. Journal of Laser Applications**, v. 33, n. 1, art. 012041, 2021.

GHANADI, N.; PASEBANI, S. **A review on Wire-Laser Directed Energy Deposition: Parameter control, process stability, and future research paths. 2024.** Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2504-4494/8/2/84>>. Acesso em: 21 abr. 2025.

FISSMER, E. E.; CUNHA, T. V.; DREVECK, N. W.; MOURA FILHO, O. C.; FERRARESI, H. N.; RANGEL, W. Z. **Analysis of laser welding parameters for ASTM A36 steel: a welding energy approach. Revista Soldagem & Inspeção**, v. 30, e3005, 2025. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/391287542_Analysis_of_Laser_Welding_Parameters_for_ASTM_A36_Steel_a_Welding_Energy_Approach>. Acesso em: 20 mar. 2025.

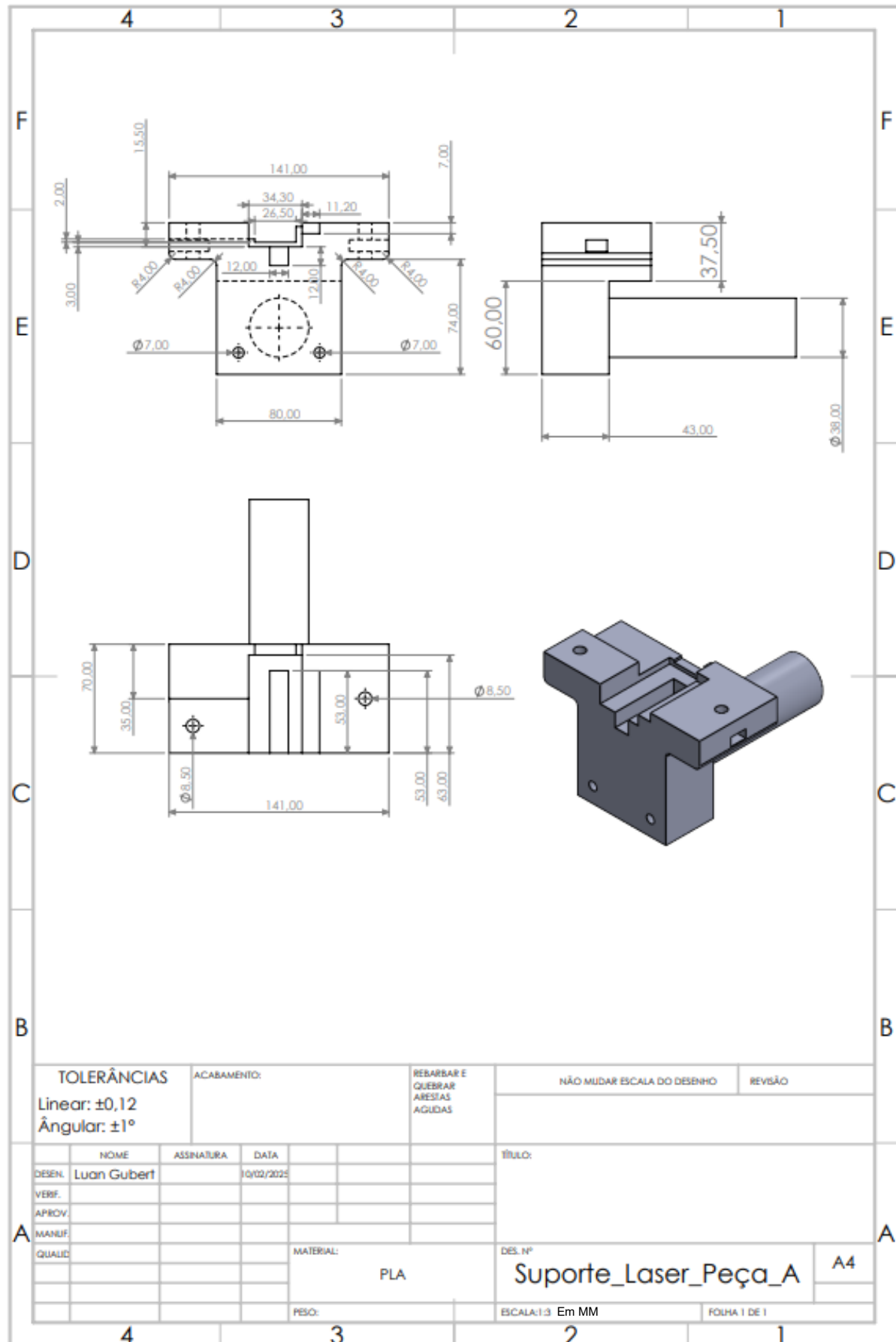
LI, Y.; WANG, Z.; LIU, C.; CHEN, F.; BI, G. **From geometric accuracy to performance: enhanced online monitoring system for thin-wall parts by fine-wire laser directed energy deposition. Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 2025. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2950431725000115>>. Acesso em: 18 abr. 2025.

MELO, J. D. D.; LINS, L. S. P.; GOMES, R. T. **A review on the metal additive manufacturing processes.** 2023. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/372864464_A_Review_on_the_Metal_Additive_Manufacturing_Processes>. Acesso em: 22 abr. 2025.

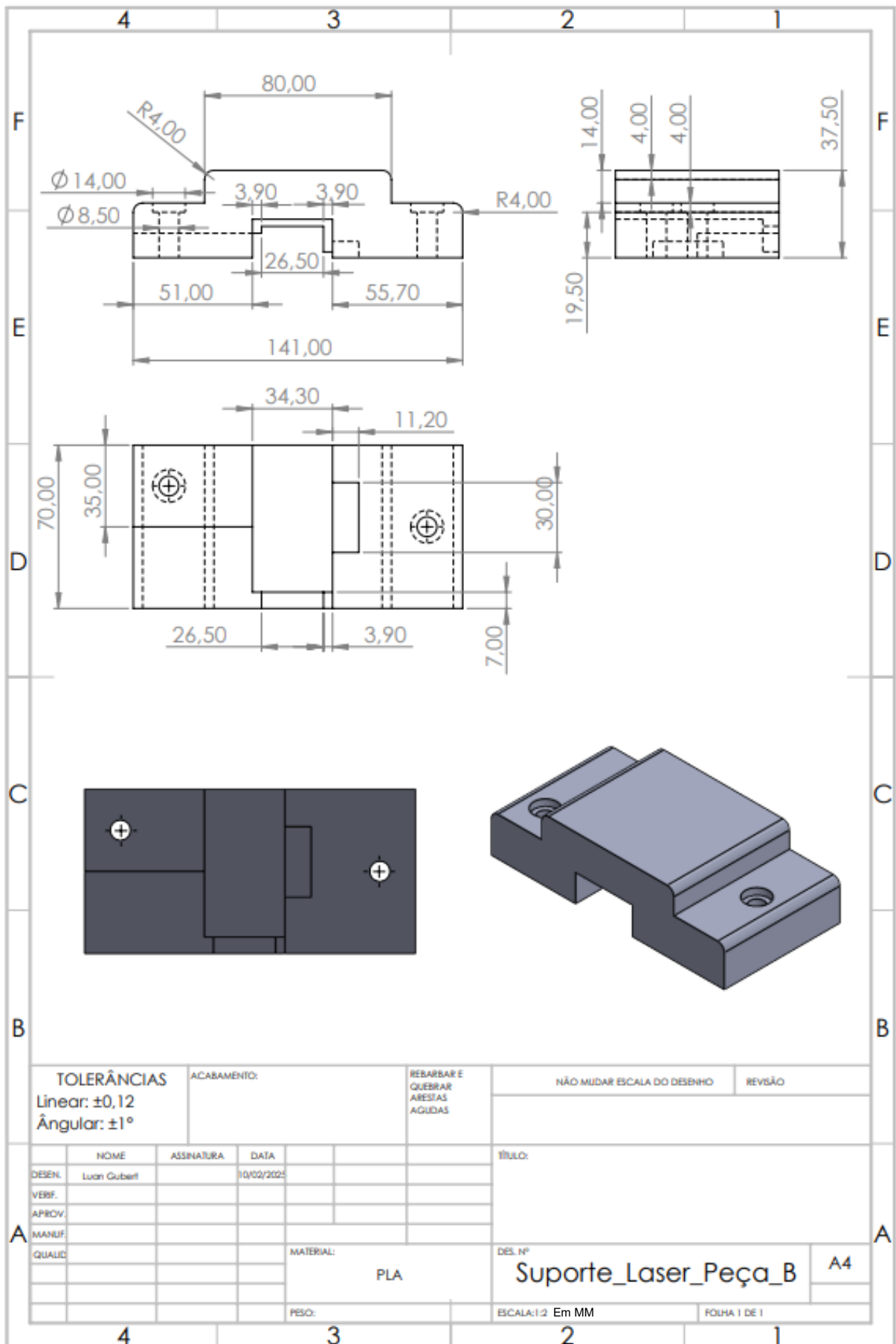
MELO, R. H. F. de; COSTA, J.; SANTA, R. A. C.; MACIEL, T. M. **Efeito do processo de soldagem na microestrutura, microdureza e composição química de revestimentos de aço inoxidável aplicados por soldagem.** *Revista Eletrônica de Materiais e Processos.* v. 7, n. 3, p. 192–204, 2012.

JOSÉ, LEONARDO. **Flexibilização de robô industrial de soldagem via o desenvolvimento de acoplador de ferramentas.** Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecatrônica) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, Câmpus Florianópolis, Florianópolis, 2022.

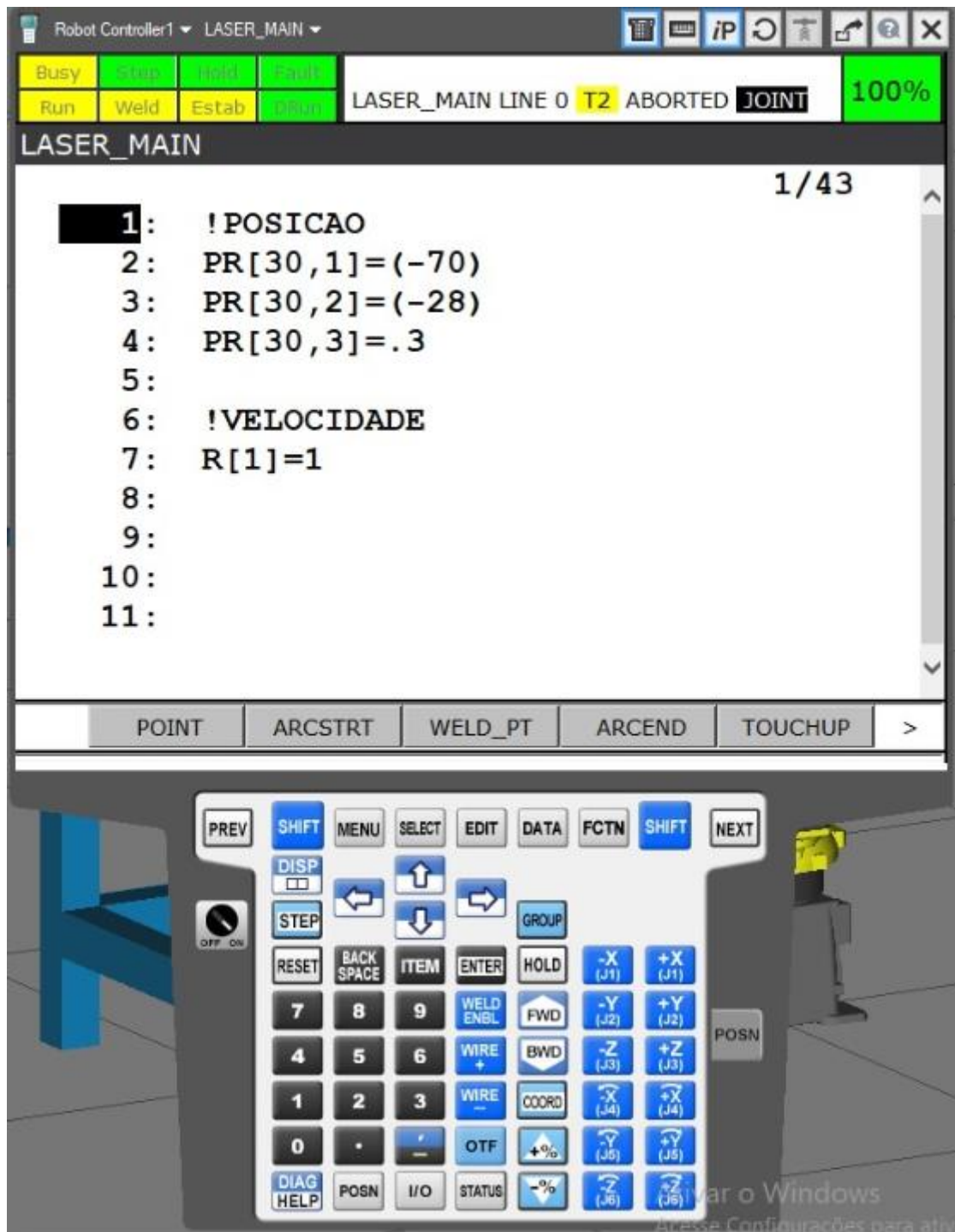
APÊNDICE A – Suporte da tocha laser: Peça A (desenho técnico)



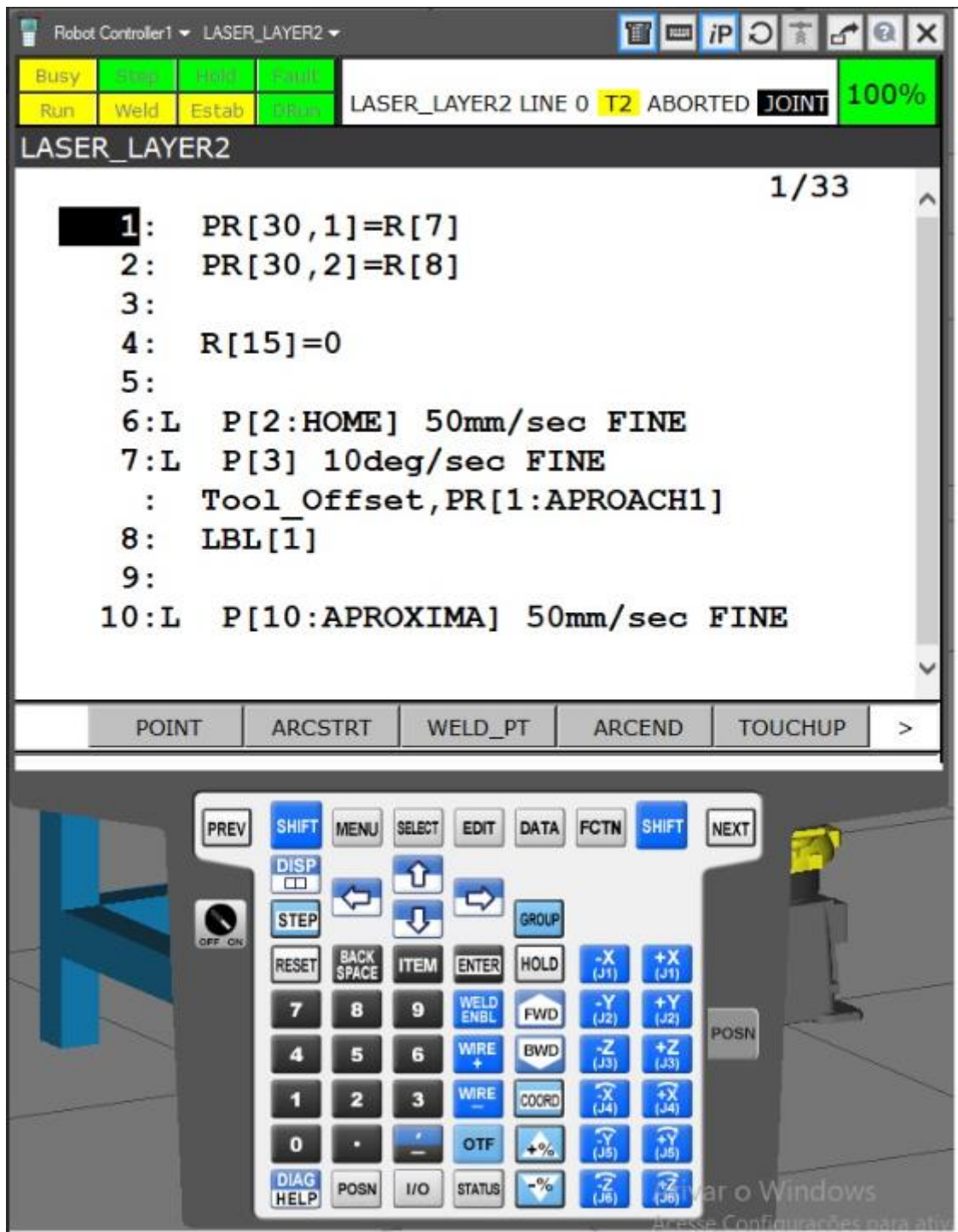
APÊNDICE B – Suporte da tocha laser: Peça B (desenho técnico)



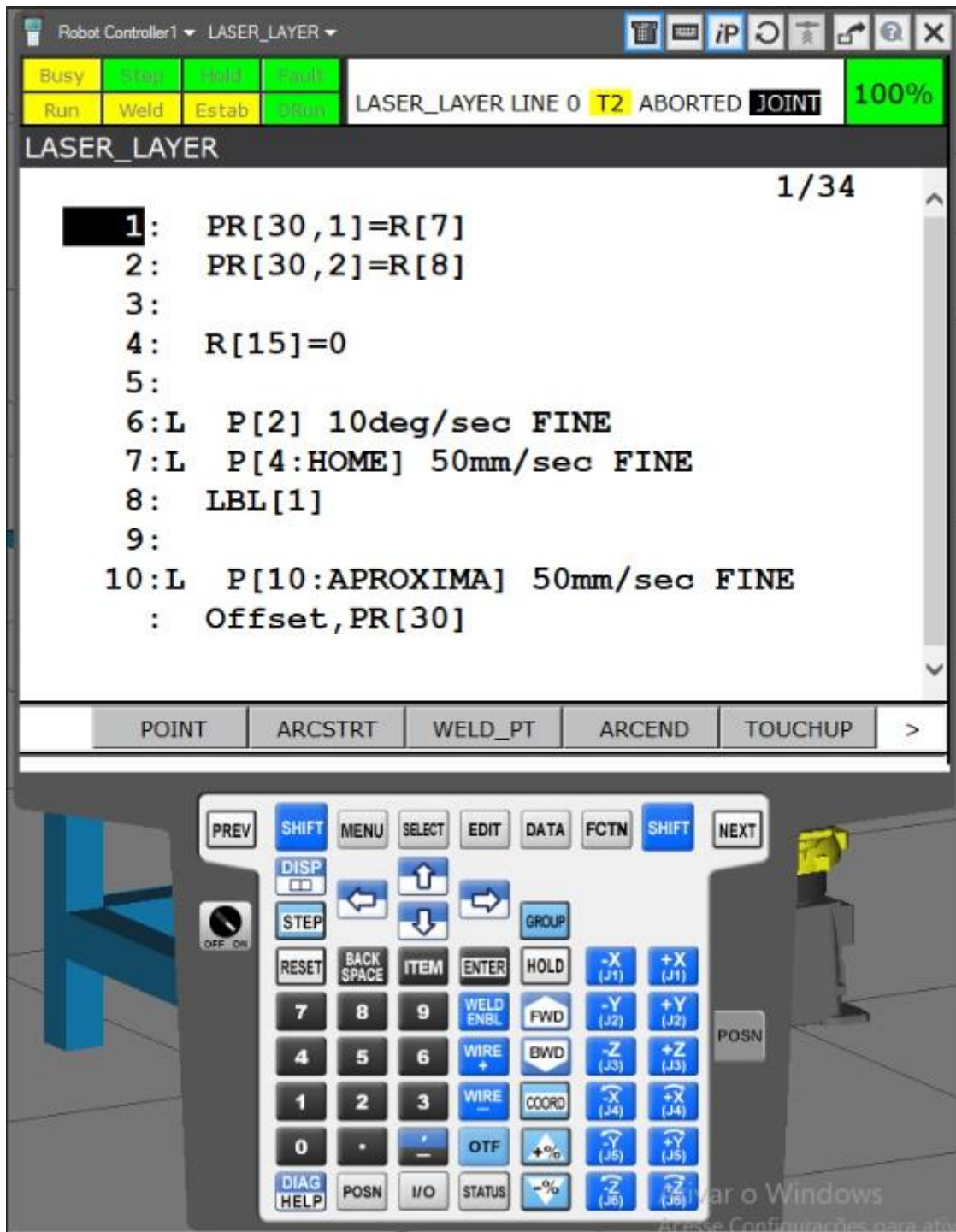
APÊNDICE C – Trecho principal (*main*) da programação do robô para o processo WLAM



APÊNDICE D – Programa de deposição para camadas ímpares no processo WLAM



APÊNDICE D – Programa de deposição para camadas pares no processo WLAM



APÊNDICE E – Código do robô para deposição do cordão

