



Associação Brasileira de Soldagem

XLVII CONSOLDA – Congresso Nacional de Soldagem
III CBMAi – Congresso Brasileiro de Manufatura Aditiva
Joinville/SC Agosto de 2025

Atualização e Integração de Sistema CNC com Manipulador Cartesiano de Três Eixos e Fonte de Soldagem para Aplicação no Processo WAAM

(Update and Integration of a CNC System with a Three-Axis Cartesian Manipulator and Welding Power Source for WAAM Process Application)

Pedro Felipe Bender¹, Fernando Costenaro Silva¹, Cleber Marques¹, Regis Henrique Goncalves e Silva¹

¹Universidade Federal de Santa Catarina, LABSOLDA – Departamento de Engenharia Mecânica, Florianópolis, SC, Brasil, pedro.bender@grad.ufsc.br

Resumo

O processo WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing) é uma tecnologia promissora para a fabricação de protótipos metálicos e peças personalizadas com geometrias complexas. Para executar geometrias complexas, o WAAM utiliza robôs antropomórficos ou sistemas CNC. Softwares como o MACH 3 possibilitam a geração e execução de trajetórias via programação e interfaces customizáveis em Flash, mas foi descontinuado devido às limitações, como o uso de porta paralela e sistema operacional de 32 bits. Este trabalho visa substituir o sistema de execução de trajetórias por soluções de código aberto, desenvolver uma interface com o usuário e integrar o sistema ao manipulador e à fonte de soldagem. Assim, o LinuxCNC, com a interface QTPlasmac, projetada para corte a plasma, foi adaptado para soldagem aditiva, permitindo o controle da altura do arco. O sistema integrou o manipulador cartesiano TrialBot e a fonte de soldagem, usando o Raspberry Pi 5 como plataforma de controle. Para validar, realizaram-se ensaios de soldagem com trajetórias lineares, além da manufatura de uma peça quadrada de 10 camadas, ajustando a altura após cada deposição para compensar as imperfeições acumuladas. Conclui-se que a integração com o LinuxCNC e o QTPlasmac melhorou o controle e a precisão da manufatura aditiva.

Palavras-chave: LinuxCNC, WAAM, Manipulador cartesiano, Raspberry Pi 5.

Abstract: The WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing) process is a promising technology for the production of metallic prototypes and custom parts with complex geometries. To achieve such geometries, WAAM employs anthropomorphic robots or CNC systems. Software like MACH 3 enables the generation and execution of toolpaths through programming and customizable Flash interfaces but has been discontinued due to limitations such as reliance on a parallel port and a 32-bit operating system. This work aims to replace that trajectory execution system with open-source solutions, develop a user interface, and integrate the system with the manipulator and welding power source. Thus, LinuxCNC, with the QTPlasmac interface originally designed for plasma cutting, was adapted for additive welding, allowing control of the arc height. The system integrated the TrialBot Cartesian manipulator and the welding power source, using a Raspberry Pi 5 as the control platform. To validate the system, welding tests with linear and oscillating toolpaths were carried out, as well as the manufacture of a 10-layer square part, adjusting the height after each deposition to compensate for accumulated imperfections. It is concluded that the integration of LinuxCNC and QTPlasmac improved control and precision in additive manufacturing.

Key-words: LinuxCNC, WAAM, Cartesian manipulator, Raspberry Pi 5.

1. Introdução

A Indústria 4.0 tem revolucionado a manufatura ao integrar tecnologias avançadas, como automação, inteligência artificial e Internet das Coisas (IoT), promovendo maior conectividade, eficiência e inteligência nos processos produtivos. Nesse cenário, a manufatura aditiva metálica emerge como uma solução inovadora, permitindo a produção de componentes com maior flexibilidade, redução de desperdícios e otimização do design, tornando-se um pilar essencial da modernização industrial. Dentre as técnicas disponíveis, o processo Wire Arc

Additive Manufacturing (WAAM) se destaca por empregar um arco elétrico como fonte de calor e um arame sólido como material de alimentação. Essa abordagem permite altas taxas de deposição, tornando viável a fabricação de estruturas metálicas de médio e grande porte com maior eficiência e menor desperdício de material Rodrigues, et al. [1].

Embora compartilhe semelhanças com a impressão 3D polimérica baseada na tecnologia Fused Filament Fabrication (FFF), na qual camadas sucessivas formam a peça final, o WAAM possui diferenças fundamentais. Enquanto a impressão 3D polimérica opera em temperaturas relativamente baixas, geralmente abaixo de 300 °C Assis [2], o WAAM utiliza temperaturas extremamente elevadas devido à fusão dos metais, por exemplo, na deposição de aço inoxidável austenítico 316L, a temperatura de trabalho é cerca de 800-1200 °C Mourão, et al. [3]. Essa diferença influencia diretamente o processo de deposição e exige um controle térmico mais rigoroso para evitar possíveis defeitos.

Na impressão 3D polimérica, o resfriamento ocorre de forma natural, permitindo a deposição contínua sem pausas entre as camadas. No WAAM, contudo, a alta temperatura acumulada pode comprometer a geometria da peça, resultando em dilatação térmica, tensões residuais e até o escoamento dos cordões depositados anteriormente. Para mitigar esses efeitos, é essencial adotar pausas entre as camadas (interpasse) garantindo que o material atinja uma temperatura controlada antes da deposição subsequente. O controle térmico é realizado por meio de sensores, como pirômetros e termógrafos, que monitoram a temperatura interpasse e ajudam a prevenir deformações excessivas, assegurando a qualidade do componente final Galeazzi [4].

A operação e o controle do processo WAAM requerem o uso de robôs antropomórficos ou sistemas CNC (Controle Numérico Computadorizado), combinados a softwares CAM (Computer Aided Manufacturing) para a geração de trajetórias. Além disso, a implementação de estratégias específicas de monitoramento e ajustes dinâmicos é essencial, como o controle da altura da tocha durante a deposição.

A interface QTPlasmac, originalmente desenvolvida para corte a plasma Linuxcnc [5], foi adaptada para possibilitar a compensação da altura do eixo Z conforme as variações da peça durante as pausas entre camadas. Essa adaptação garante uma deposição precisa do material, minimizando os efeitos da alta temperatura acumulada e preservando a integridade geométrica da peça.

Este trabalho tem como objetivo apresentar a adaptação e integração do LinuxCNC ao WAAM, avaliando sua viabilidade como sistema de controle para a manufatura aditiva metálica, validando assim a utilização de um software de código aberto modificado para o controle de movimentação da tocha no processo de soldagem.

Inicialmente desenvolvido para usinagem, o Mach3 é um software de controle CNC amplamente utilizado na automação de processos industriais, incluindo a soldagem. Sua flexibilidade permite a programação de trajetórias específicas para a tocha de solda, além da reconfiguração da interface gráfica para sincronizar os movimentos com os requisitos do arco elétrico, melhorando a qualidade e a consistência dos cordões de solda. Carvalho [6] demonstrou a aplicabilidade do Mach3 na automação da soldagem, configurando rotinas específicas e otimizando a interação entre o sistema CNC e a fonte de soldagem, reforçando a viabilidade do uso desse software para processos de manufatura aditiva baseados em soldagem.

O uso de controladores CNC aplicados ao WAAM foi explorado também por Ščetinec et al. [7], que demonstraram a viabilidade de um outro software de controle denominado LinuxCNC para o controle avançado do processo. Além de compartilhar as mesmas funcionalidades básicas do Mach3, o LinuxCNC se destaca por sua arquitetura aberta e altamente configurável, permitindo uma personalização mais profunda dos parâmetros do processo e uma maior compatibilidade com diferentes hardwares. Embora o replanejamento de trajetórias seja realizado por softwares externos, o LinuxCNC executa essas trajetórias com alta precisão e possibilita o controle online da altura das camadas, garantindo maior qualidade na deposição do material. Sua flexibilidade e capacidade de integração com sistemas de monitoramento tornam-no uma alternativa promissora para aplicações de WAAM, permitindo ajustes dinâmicos e otimização do processo em tempo real.

Um dos desafios do WAAM está na minimização das distorções geométricas causadas pelo acúmulo excessivo de calor, especialmente em componentes de pequeno porte. Kozamernik [8] analisou esse problema e sugeriu a adoção de refrigeração forçada combinada com tempos de espera entre camadas como solução para mitigar deformações e escoamentos durante a deposição. Essa abordagem resulta em melhorias significativas na estabilidade dimensional das peças e na eficiência do processo.

Além disso, Galeazzi [4] observou que temperaturas de interpasse acima de 200 °C afetam negativamente a geometria dos cordões depositados. Para evitar essas variações, adotou-se o controle da temperatura de interpasse, mantendo-a abaixo de 150 °C por meio de medições com pirômetro. Essa estratégia foi implementada para garantir a repetibilidade do processo e reduzir falhas decorrentes do superaquecimento. Dessa forma, a literatura demonstra que tanto o controle do processo quanto o uso de sistemas CNC adequados são fundamentais para a aplicação do WAAM. O LinuxCNC se apresenta como uma solução simples e adaptável, permitindo não apenas o controle da deposição do material, mas também a integração com estratégias de monitoramento térmico e ajustes automatizados, contribuindo para a melhoria da qualidade das peças fabricadas.

2. Matérias e Métodos

Para a aplicação da tecnologia WAAM, foi utilizada a estrutura mecânica da plataforma TrialBot Figura 1A, uma máquina CNC cartesiana de três eixos (X, Y e Z), equipada com fusos trapezoidais e motores de passo, projetada para operar com uma tocha de soldagem. O sistema também conta com uma mesa refrigerada a água, essencial para o controle térmico durante o processo de deposição. O hardware do sistema foi integrado em um gabinete Figura 1B, no qual o Raspberry Pi 5 executa o software LinuxCNC com a interface de usuário QTPlasmaC. Esse sistema é responsável pela geração dos pulsos de controle para os motores do TrialBot, funcionando de maneira similar à porta paralela convencional utilizada em máquinas CNC.

O controle da plataforma foi adaptado para o WAAM por meio de modificações no componente PlasmaC do LinuxCNC, redefinindo seu comportamento para corrigir a altura da camada durante a operação de soldagem. Além disso, foram implementadas alterações no procedimento de finalização do movimento, garantindo que o sistema redefina o offset inserido para a correção da camada ao reposicionar o eixo Z.

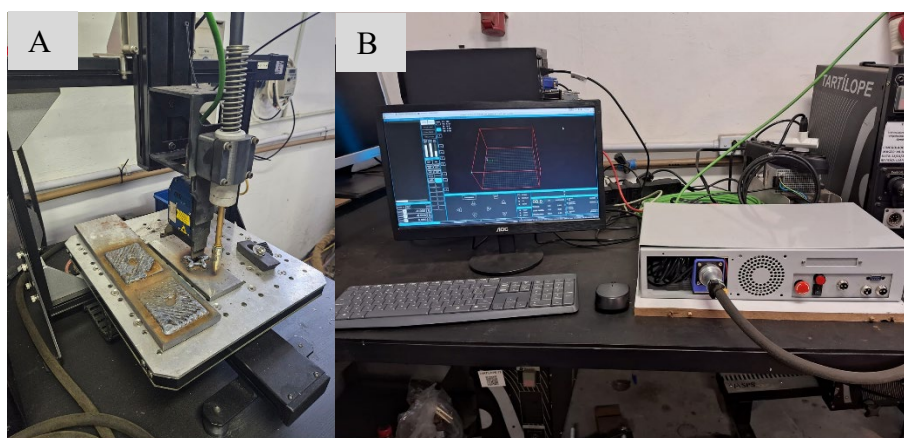


Figura 1. Trialbot (A) e interface e gabinete do sistema (B)

O condicionamento dos sinais de controle dos motores é realizado por uma placa customizada que integra optoacopladores, relés e um CI com transistores Darlington, proporcionando isolamento elétrico e proteção dos sinais enviados aos drivers dos motores de passo. A unidade central de processamento é um Raspberry Pi 5, um computador de placa única equipado com 8 GB de memória RAM e interfaces de entrada/saída GPIO (General Purpose Input/Output), permitindo a comunicação eficiente com os demais componentes do sistema.

A Figura 2 apresenta o diagrama de blocos da arquitetura implementada, destacando a conexão do Raspberry Pi 5 com um monitor, teclado e mouse, que, em conjunto, formam a Interface Homem-Máquina (IHM) para interação do operador. A placa de interface isolada CNC é ligada ao Raspberry Pi por meio dos pinos de GPIO, recebendo sinais de controle e protegendo o sistema ao condicioná-los antes de enviá-los aos drivers dos motores de passo. Esses drivers, por sua vez, estão conectados individualmente aos motores do Trialbot, que opera com uma tocha de soldagem para permitir a operação WAAM.

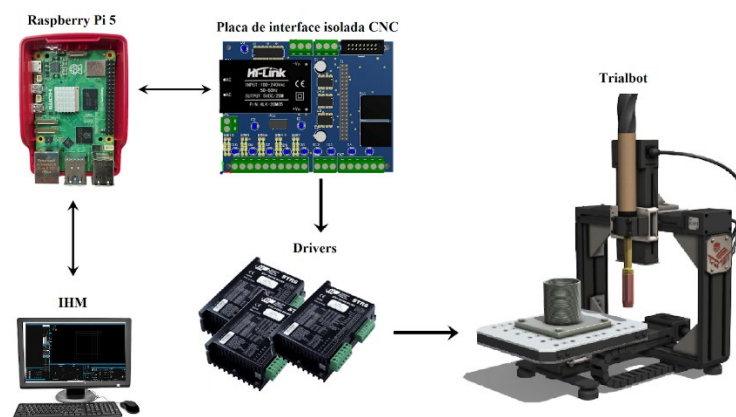
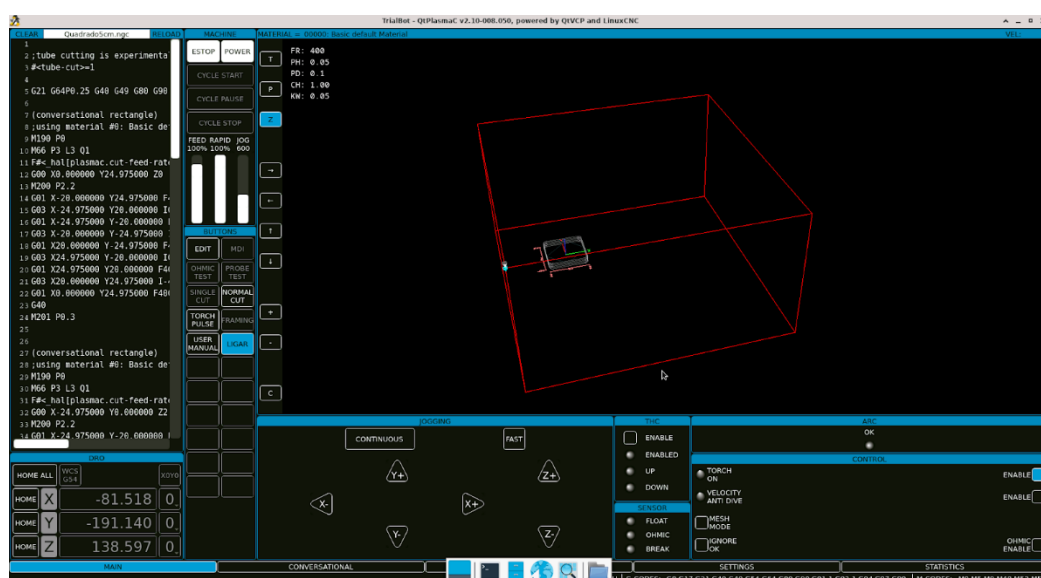


Figura 2. Fluxo de conexões do sistema

A versão do software LinuxCNC utilizada é a 2.10, em função dos recursos mais recentes do sistema, além da otimização do sistema e compilação diretamente no Raspberry Pi 5. O LinuxCNC pode ser operado na opção compilada localmente, além de poder ter seus arquivos de código fonte da interface de operação alterados e recompilados, agilizando as correções no comportamento da máquina de acordo com os requisitos operacionais que foram necessários durante os testes.

A interface QTPlasmaC apresentada na Figura 3, utilizada nas operações, é uma solução gráfica desenvolvida para o controle de sistemas de corte a plasma no LinuxCNC. Construída utilizando o framework Qt e a linguagem Python, essa interface permite a configuração e o monitoramento do sistema em tempo real, indicando a posição atual da ferramenta no sistema Linuxcnc [5].



durante o processo de corte. No entanto, para adequá-lo ao WAAM, foi necessário desativar essa abertura automática do arco e utilizar um macro experimental presente na versão de teste do LinuxCNC chamado Probe. Esse recurso foi integrado às modificações do PlasmaC para realizar a abertura do arco, possibilitando um refinamento no controle da altura da tocha.

Para implementar o controle de pausas e ajustes na altura do eixo Z durante os períodos de resfriamento, foram realizados ajustes específicos no módulo PlasmaC. Essas modificações permitiram que a operação aguardasse um sinal externo para prosseguir e possibilitaram correções manuais entre as camadas. Além disso, o Controle de Altura da Tocha (THC) do QTPlasmaC foi alterado para manter suas funcionalidades durante as pausas, permitindo o movimento do eixo Z mesmo nesse estado, o que não era possível na implementação original.

Os testes de movimentação foram conduzidos por meio da execução de trajetórias lineares e padrões de tecimento, sem deposição de material, com o objetivo de validar a operação do sistema em condições simuladas de soldagem. Durante os ensaios, foram verificadas a precisão dos deslocamentos, a sincronização dos tempos de parada e retomada entre as pausas programadas e a correta execução dos tempos de abertura e extinção do arco elétrico. Além disso, a comunicação com a fonte de soldagem foi monitorada para assegurar a integração adequada ao controle, excetuando-se apenas a ativação efetiva do processo de deposição. A movimentação foi executada de forma satisfatória em conjunto com a comunicação serial, validando assim a operação do sistema e permitindo a integração com o sistema de soldagem real.

Para avaliar o desempenho do sistema de controle no WAAM, o sistema foi integrado com o TrialBot e fonte de solda. Foi realizado um teste operacional de soldagem de cascas, utilizando uma geometria quadrada de 50 mm de lado e cantos arredondados. O design foi projetado para minimizar o acúmulo excessivo de material nas extremidades, reduzindo variações geométricas causadas por mudanças bruscas de direção nos eixos. Como ilustrado na Figura 4A, a primeira camada resultou em um cordão uniforme, com poucas irregularidades. Já na Figura 4B, que exibe a décima camada impressa, observa-se que a trajetória planejada foi seguida corretamente ao longo dos 10 cordões. No entanto, foram identificadas pequenas irregularidades na transição entre o início e o fim dos cordões, propagando-se pelas camadas subsequentes.

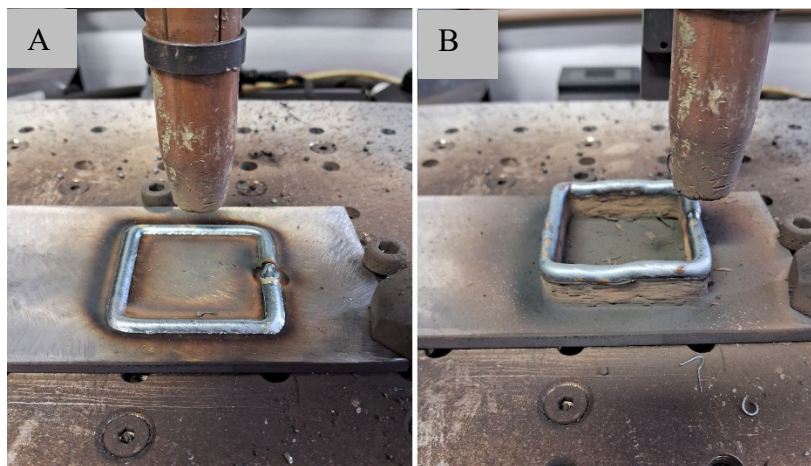


Figura 4. Teste de soldagem com um quadrado na primeira camada (A) e Décima camada (B)

Para avaliar a operação, foram registrados os cordões de solda em cada pausa de camada, juntamente com a posição correspondente no QTPlasmaC. Esses registros permitiram a comparação dos pontos de início e fim de cada cordão, evidenciando os pontos de parada de cada camada. A Figura 5 apresenta o resultado da trajetória gerada e das soldas, destacando as cinco primeiras camadas (C1 a C5).

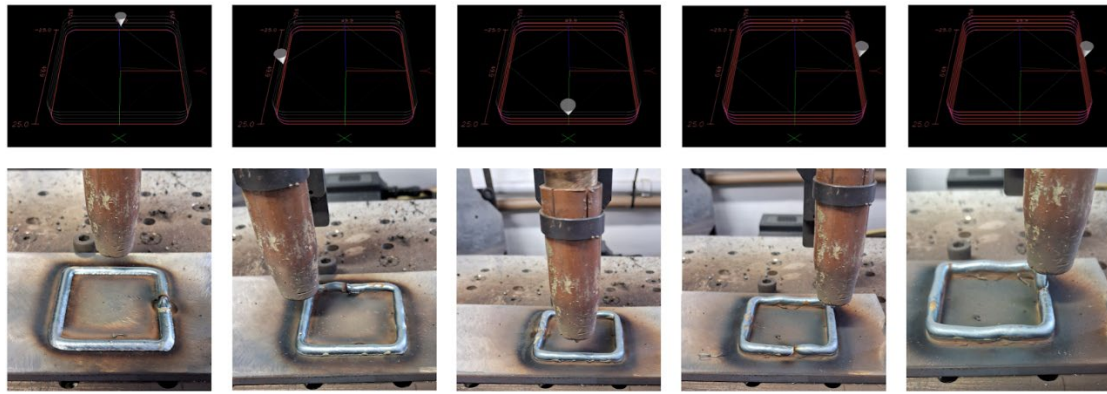


Figura 5. Posições do Trialbot relativas ao QTplasmac ao final de cada camada

O monitoramento térmico foi realizado utilizando um termógrafo, garantindo que a temperatura interpasse permanecesse abaixo de 150 °C antes da deposição da camada seguinte. A Figura 6 ilustra o acompanhamento térmico durante a deposição da última camada. Com base nas medições, o sistema recebia um comando manual para dar continuidade ao processo, assegurando a estabilidade térmica e minimizando deformações na peça fabricada.



Figura 6. Termografia durante o interpasse da última camada

Por fim, foi depositada uma peça sólida com 10 camadas Figura 7. Durante a deposição, ajustes na altura da tocha foram realizados entre as camadas para manter as características e evitar variações na geometria. Os resultados demonstram a eficácia das modificações introduzidas, validando sua aplicação na WAAM e contribuindo para a qualidade e repetibilidade da manufatura aditiva.



Figura 7. Peça sólida produzida com WAAM em 10 camadas: vista diag (esq.) e superior (dir.)

A análise das peças fabricadas evidenciou a execução correta das trajetórias e a aderência ao planejamento geométrico. A evolução da deposição entre as camadas destaca a necessidade de ajustes contínuos nos parâmetros térmicos e operacionais para aprimorar a previsibilidade e a uniformidade do processo.

4. Conclusões

A manufatura aditiva das peças fabricadas demonstrou a viabilidade do sistema desenvolvido, validando as modificações implementadas no software para execução de trajetórias, operação do sistema e controle em tempo real da altura da tocha. As adaptações realizadas no PlasmaC do LinuxCNC possibilitaram a integração eficiente com a fonte de soldagem, permitindo a operação do sistema de forma sincronizada e controlada.

A estratégia de pausa interpasse, bem como a configuração dos macros para controle dos tempos de início e término do arco elétrico, operou conforme o planejado, garantindo tempos de espera adequados e a correta ativação da soldagem. As estratégias adotadas para a operação do sistema se mostraram funcionais dentro das limitações do processo GMAW convencional utilizado.

Os resultados obtidos abrem caminho para novas pesquisas, incluindo o desenvolvimento de um sistema de correção automática baseado na tensão do arco, o que pode aprimorar ainda mais a estabilidade e a precisão do processo WAAM.

5. Agradecimentos

A equipe do LABSOLDA agradece aos financiadores CNPq, CAPES, PETROBRAS e UFSC.

6. Referências Bibliográficas

- [1] RODRIGUES, T. A. et al., 2019. Current Status and Perspectives on Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM). Materials, [S.L.], v. 12, n. 7, p. 1121, 4 abr. 2019. MDPI AG. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1996-1944/12/7/1121>>. Acesso em: 10 fev. 2024.
- [2] ASSIS, C. L. F. de., 2022. Influência da temperatura de extrusão na resistência mecânica de peças de ABS/PC fabricadas por impressão 3D. Votuporanga: Instituto Federal de São Paulo (IFSP). Disponível em: <<https://vtp.ifsp.edu.br/images/nupem/Artigo05-2022.pdf>>. Acesso em: 15 jan. 2025.
- [3] MOURÃO, J. N. P., 2020. Inovação tecnológica do processo WAAM com vibração mecânica do banho de fusão. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2020. Disponível em: <https://run.unl.pt/bitstream/10362/120677/1/Mourao_2020.pdf>. Acesso em: 18 fev. 2025.
- [4] GALEAZZI, D., 2024. Desenvolvimento de um sistema integrado de manufatura aditiva por deposição a arco usando a variante GMAW com alimentação dinâmica CMT. 2024. 278 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós Graduação em Mecânica, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. Disponível em: <https://labsolda.ufsc.br/publicacoes/teses_dissertacoes/tese_2024_daniel.galeazzi.pdf>. Acesso em: 17 mar. 2025.
- [5] LINUXCNC (org.). QtPlasmaC. Disponível em: <<https://linuxcnc.org/docs/html/plasma/qtplasmac.html>>. Acesso em: 18 mar. 2025.
- [6] CARVALHO, R. S. Robô CNC para a Automação da Soldagem MIG/MAG em Posições e Situações de Extrema Dificuldade. 2009. 121 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- [7] ŠČETINEC, A. et al., 2021. In-process path replanning and online layer height control through deposition arc current for gas metal arc based additive manufacturing. Journal of Manufacturing Processes, [S.L.], v. 64, p. 1169-1179, abr. 2021. Elsevier BV. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.02.038>>. Acesso em: 10 abr. 2025.
- [8] KOZAMERNIK, N. et al., 2020. WAAM system with interpass temperature control and forced cooling for near-net-shape printing of small metal components. The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology, [S.L.], v. 110, n. 7-8, p. 1955-1968, 31 ago. 2020. Springer Science and Business Media LLC. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-020-05958-8>>. Acesso em: 15 abr. 2025.
- [9] ZANELLA, G. G. et al., 2024. Influência da Composição do Gás de Proteção na Formação de Sílica em Operações de Reparo Mecanizado Usando GMAW e Arame de Aço ER70S6. In: XLVI CONSOLDA – Congresso Nacional de Soldagem; II CBMAdi – Congresso Brasileiro de Manufatura Aditiva, Uberlândia/MG, 26 a 28 ago. 2024 Anais do Congresso. Disponível em: <https://labsolda.ufsc.br/publicacoes/artigos/2024_consolda_Giulia.Zanella.pdf>. Acesso em: 27 fev. 2025.