

CONCEPÇÃO, IMPLEMENTAÇÃO E AVALIAÇÃO DO SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO DE ARAME COM AQUECIMENTO POR INDUÇÃO APLICADO AO L-DED

Manoel Kolling Dutra

Milton Pereira

Fellipe Augusto Filipim Lavaqui

Tiago Colvara Faria

LMP – Laboratório de Mecânica de Precisão – EMC – CTC - Universidade Federal de Santa Catarina Florianópolis CEP 88040-900 – Santa Catarina - Brasil

manoel.kolling@posgrad.ufsc.br

milton.pereira@ufsc.br

lavaquifellipe@gmail.com

tiagocf1208@gmail.com

Resumo: O processo de Deposição Direcionada de Energia a Laser (L-DED) se apresenta como uma técnica industrial bem estabelecida para a deposição precisa de revestimento e fabricação por manufatura aditiva. O revestimento a laser objetiva melhorar o desempenho da superfície, prolongando assim a vida útil de muitos componentes em ambientes de desgaste corrosivo e abrasivo severo. O revestimento a laser com arame consiste em alimentar o material depositado com um arame, que é fundido por uma fonte de energia laser e manipulado sobre o volume de deposição. Este processo mostra algumas vantagens sobre sistemas baseados em pó, tais como ambiente de processamento mais limpo, custo ambiental reduzido para a produção do arame, ausência de desperdício do material de adição e uma maior taxa de deposição de material. Por meio de equipamentos inovadores, como sistemas de alimentação de arame dedicados e técnicas de pré-aquecimento, estratégias de fabricação personalizadas podem melhorar a qualidade e produtividade do revestimento. Entre as inovações recentes, o pré-aquecimento do arame resulta em menores taxas de energia entregues pelo laser. Este tipo de aquecimento é chamado de hot-wire. O hot-wire é bem conhecido na soldagem por arco, onde sua sincronização com os parâmetros elétricos do arco proporciona um aumento drástico na estabilidade e controlabilidade da transferência metálica. Com base nisso, o presente artigo aborda o desenvolvimento de um alimentador de arame com aquecimento indutivo integrado, a partir do qual foi realizada uma caracterização geométrica dos cordões depositados e uma caracterização do perfil de temperatura de aquecimento do arame com a medição por imagem termográfica para validar o dispositivo desenvolvido e seus periféricos quanto à estabilidade de deposição.

Palavras-chave: L-DED; revestimento; hot-wire; aquecimento indutivo.

1. INTRODUÇÃO

O processamento de materiais a laser vem ganhando cada vez mais espaço nas diversas aplicações industriais como soldagem, revestimento e manufatura aditiva, por exemplo, e isto ocorre devido a algumas características como seu relativamente baixo aporte térmico, aquecimento preciso, baixa distorção, e alta flexibilidade de processamento (Poprawe, 2011). Nas aplicações de revestimento de superfícies, um material de adição é inserido ao processo para gerar camadas depositadas, sendo que este material pode ser depositado a partir de arame ou pó.

O revestimento a laser com arame consiste em alimentar o material depositado com um arame, que é fundido por uma fonte de energia laser e manipulado sobre o volume de deposição (Kisielewicz et al., 2021). Este processo mostra algumas vantagens sobre sistemas baseados em pó, tais como ambiente de processamento mais limpo, custo ambiental reduzido para a produção do arame, ausência de desperdício do material de adição e uma maior taxa de deposição de material (Segerstark, 2017). Entretanto, existem alguns desafios a serem superados quando se trata de deposição com arame devido às exigências para alimentar com precisão o arame no ponto focalizado do laser, garantindo fundir o arame e o metal de base ao mesmo tempo e gerando uma deposição uniforme e controlada (Peng, Jiguo, Shiqing, e Gang, 2016).

Uma das técnicas que vem ganhando espaço para melhorar a estabilidade do processo é o pré-aquecimento do arame ou hot-wire (Huang, Xiao, Chen, e Jiang, 2022; Kisielewicz et al., 2021). O arame pré-aquecido reduz as exigências de posicionamento relativo entre o arame e o feixe de laser. Além disso, obtém-se uma eficiência mais alta de deposição e os danos causados pelo aquecimento ao metal de base são reduzidos durante o processo (Huang et al., 2022; Zhao, Xu, Huang, e Yang, 2021).

Portanto, o desenvolvimento de equipamentos que tenham a capacidade de realizar a deposição de arame de forma mais estável e que possam integrar técnicas como o hot-wire vem ganhando espaço na literatura, visando aprimorar e

otimizar os processos de deposição por arame (Voigt, Cunha, e Niño, 2020). O presente trabalho se propõe a contribuir nessa área, ao apresentar o desenvolvimento de um sistema de alimentação de arame capaz de pré-aquecer o arame através de um circuito indutivo, para uso em L-DED.

2. METODOLOGIA

O projeto do sistema foi desenvolvido com base na metodologia Prodiip (Back, Ogliari, Dias e Silva, 2010) adaptada. No projeto informacional, foram definidos os *stakeholders* suas necessidades e os requisitos de projeto, bem como as ordens de importância para cada um dos requisitos. Nessa etapa, foram estabelecidos quatro requisitos de projeto mecânico, de forma a garantir o desempenho satisfatório do alimentador de arame.

1. A rigidez da estrutura da base de fixação deve ser tal que apresente deformações e vibrações desprezíveis quando estiver em operação;
2. O alinhamento do arame em relação ao foco do feixe do laser deve garantir estabilidade durante o processo de deposição;
3. A alocação de um módulo de bobinas e circuito eletrônico deve ser o mais próximo possível da área de trabalho para realizar o pré-aquecimento por indução do arame depositado;
4. Deve haver intercambialidade entre os cabeçotes de arame e pó disponíveis para serem utilizados na máquina;

Já para os requisitos eletroeletrônicos do sistema foram considerados os seguintes pontos:

1. O alimentador de arame deve apresentar um sistema de aquecimento indutivo;
2. Deve possuir um hardware que seja capaz de realizar a alimentação do arame;
3. Deve ser capaz de suprir potência elétrica necessária para o acionamento das bobinas de indução;

Posteriormente, o projeto foi dividido em duas frentes: o projeto mecânico e o projeto eletroeletrônico, nas quais as concepções e suas análises foram realizadas de maneira simultânea ao seu desenvolvimento, a fim de proporcionar uma maior velocidade e dinâmica ao projeto.

2.1 Projeto mecânico

Nesta etapa, como meta inicial buscou-se garantir a rigidez estrutural do sistema. Desta forma, a fixação consiste em uma base de tubos com seção transversal quadrada de dimensões de 30 mm x 30 mm com espessura de parede de 2 mm. Formando um braço que garante o paralelismo entre o dispositivo e o cabeçote do laser, a união dos tubos foi feita através do processo de soldagem MIG/MAG.

Uma chapa de aço de 3 mm foi fixada a essa estrutura primária para garantir a montagem e posicionamento dos demais sistemas do alimentador de arame (tracionador, sistema de direcionamento e bobinas). Por fim, todo o conjunto é fixado pela estrutura primária ao cabeçote do laser de forma a possibilitar a retirada do sistema para a manutenção e utilização do cabeçote de pó, usado em outra configuração do sistema.

Para realizar a movimentação do arame, é usado um servo motor com um acoplamento elástico em seu eixo e um espaçador que permite o posicionamento correto do conjunto na chapa metálica. Do outro lado da chapa é montado o tracionador, de forma que o seu eixo fique parafusado no acoplamento elástico do motor. A Figura 1 apresenta o modelo proposto da estrutura de fixação e do sistema de acoplamento entre motor e tracionador.

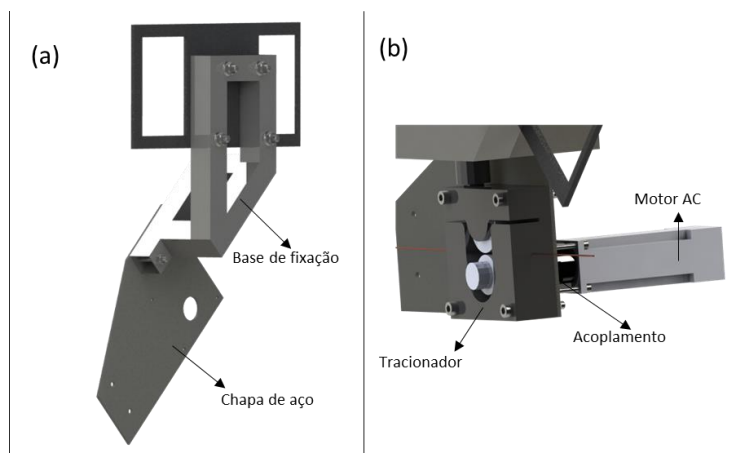


Figura 1. Modelo da concepção da estrutura mecânica (a) e do sistema de acoplamento (b)
(Os Autores, 2022)

Um dos aspectos mais importantes relacionados à disposição construtiva do sistema foi garantir que o arame se mantivesse alinhado com o feixe do laser durante o processamento. Para cumprir este requisito, depois do tracionador

foram utilizados dois bicos de contato para equipamentos de soldagem, com abertura igual ao diâmetro do arame, de 1,2 mm, com o objetivo de alinhar o arame e mantê-lo no mesmo plano do feixe de laser.

Também foi implementado um posicionador com três graus de liberdade e ajuste fino, baseado em parafusos com rosca sem fim, para refinar o posicionamento do alimentador, possibilitando que o arame trabalhe exatamente na posição desejada, alinhado com o feixe de laser.

No espaço que o direcionador do arame impôs no sistema, foi posicionada a bobina de aquecimento, deixando o conjunto compacto. Como o modo de aquecimento proposto é realizado por indução eletromagnética, é de grande importância que não haja qualquer condutor de campo no interior da bobina, se não o próprio arame.

A Figura 2 ilustra em (a) o dispositivo para garantir o alinhamento do arame com o feixe e em (b) a bobina de aquecimento indutivo posicionada.

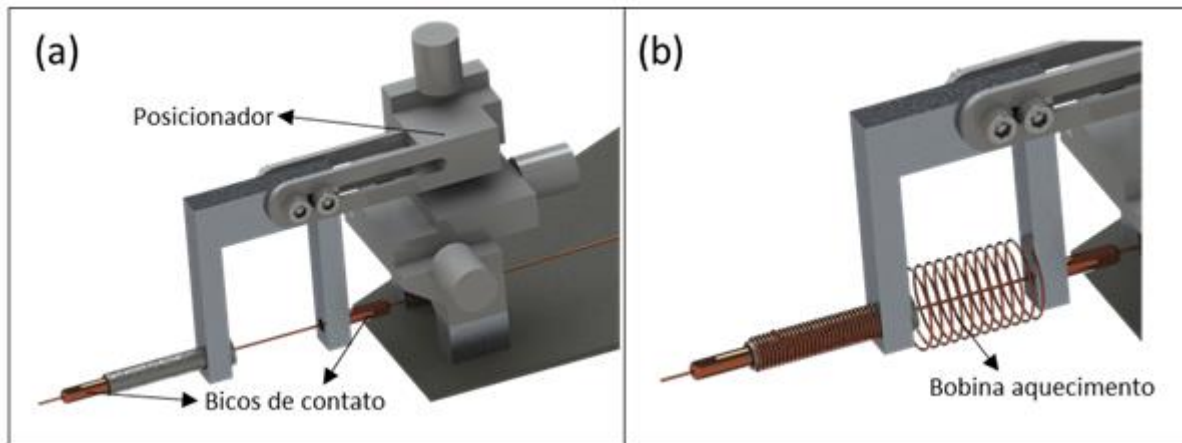


Figura 2. Sistema de ajuste de posição (a) posição da bobina de aquecimento indutivo (b)
(Os autores, 2022)

As concepções e soluções geradas atendem aos requisitos de projetos estipulados, gerando a concepção final, que foi fabricada e acoplada ao sistema laser para a montagem do protótipo, que pode ser visualizado na Figura 3.

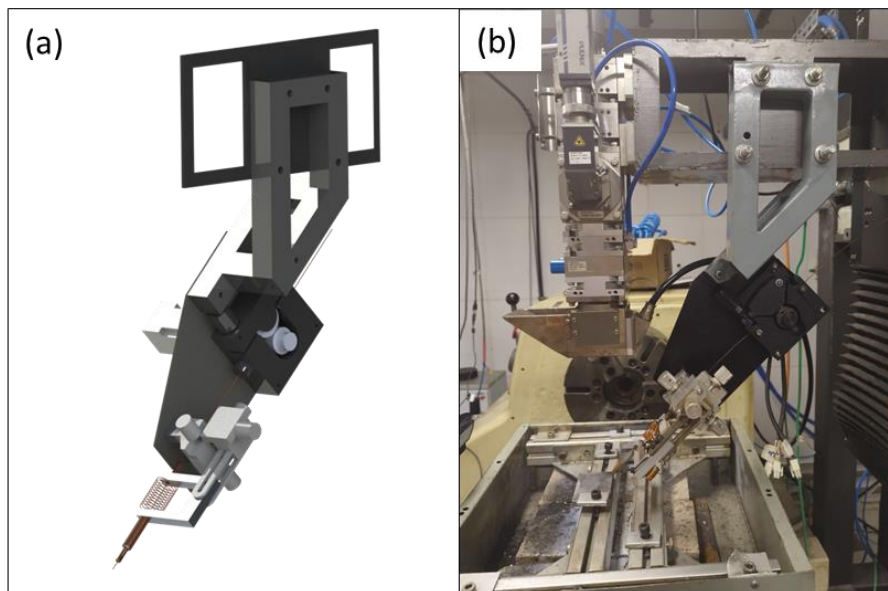


Figura 3. Sistema de alimentação de arame projetado (a) e construído (b)
(Os autores, 2022)

2.2. Projeto eletroeletrônico

Para a concepção do projeto elétrico, o conjunto eletroeletrônico foi dividido em 3 partes:

1. Acionamento do servomotor que traciona o arame;
2. Sistema de pré-aquecimento indutivo;
3. Integração mecatrônica;

Para deslocamento do arame, o motor escolhido foi um servo motor PANASONIC modelo CA MSMD012P1T, devido à sua resolução de 10 mil passos por rotação e velocidade de até 3000 rpm. Para o acionamento do servomotor, foi empregado um módulo de controle MINAS A4 com controle PID integrado. Esse módulo é alimentado por uma fonte contínua e recebe pulsos de um Arduino, que comanda a velocidade e direção de rotação do motor e transforma essas informações em um sinal de potência de 220V CA, que movimenta o eixo do motor.

Quanto ao circuito de pré-aquecimento, foi projetado um circuito LC que consiste em um capacitor e um indutor em paralelo com dois *mosfets* conectados em suas extremidades, que chaveiam o sinal de referência de aterramento do circuito, de modo a manter a corrente no sistema em uma dinâmica oscilatória. A bobina que realiza o aquecimento possui um *tap* central que recebe uma tensão contínua positiva. Essa tensão carrega o capacitor, que faz o primeiro *mosfet* parar de permitir a passagem de corrente e o segundo entrar em regime de condução, assim invertendo o referencial do sinal de referência. Essa inversão faz com que o indutor induza uma tensão reversa para se opor à mudança, o que carrega o capacitor com a polaridade invertida e causa novamente o chaveamento dos *mosfets*. Esse ciclo se repete continuamente, resultando em uma rápida variação do campo no indutor, em uma frequência que trabalha em torno de um ponto de operação de 250kHz.

A variação de campo magnético presente no indutor causa o aquecimento indutivo do arame por meio das correntes parasitas de Foucault que são induzidas no mesmo. A alta frequência imposta no circuito oscilador LC se faz necessária devido ao diâmetro do arame e ao efeito de borda, já que caso ele não seja respeitado, ocorre a saturação magnética do material e a eficiência total do aquecimento diminui.

A Figura 4 (a) apresenta o circuito de pré-aquecimento juntamente a sua fonte e o circuito para controle e alimentação do servomotor, e em (b) a bobina de pré-aquecimento com o arame de alimentação do processo passando pelo seu interior.

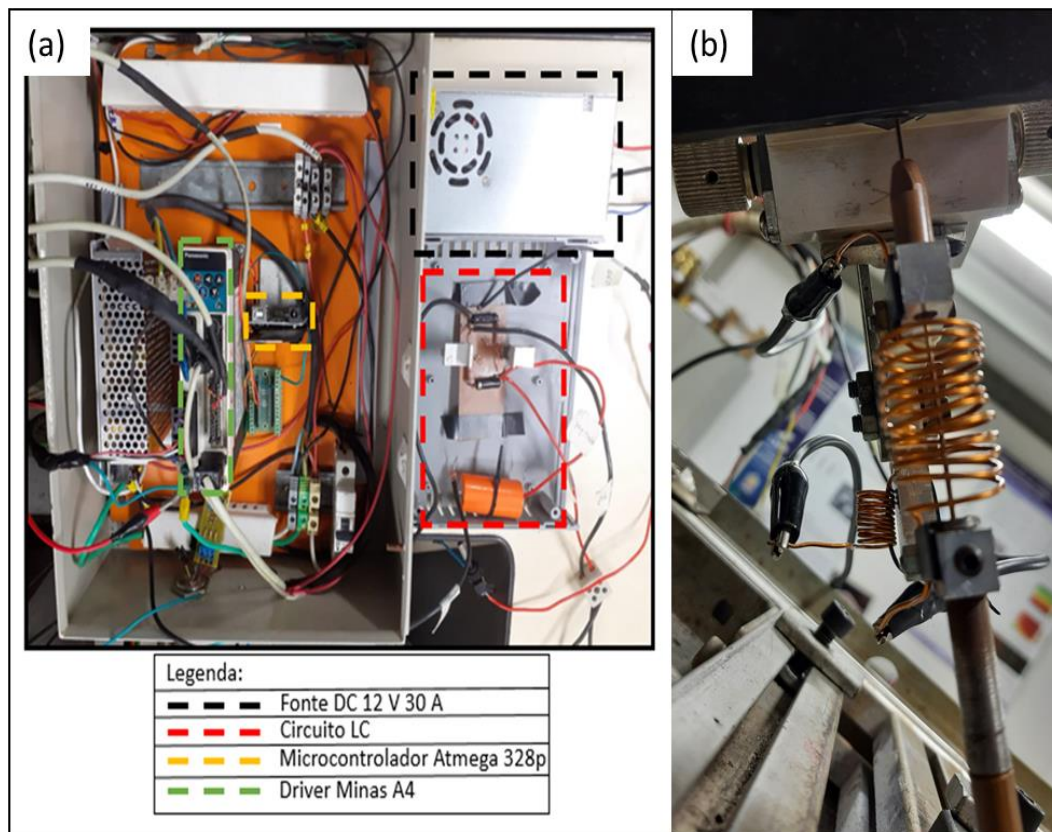


Figura 4. Circuito eletro/eletrônico (a) e bobina de pré-aquecimento (b)
(Os autores, 2022)

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com o intuito de avaliar o projeto mecânico e o hardware de comando para alimentação de arame, o protótipo construído foi submetido a uma série de testes. O primeiro deles verificou a repetibilidade do processo, no qual nove cordões foram depositados em chapas de aço carbono SAE 1020 com arame ER70S-06 e seus comprimentos medidos. Tal material foi escolhido devido sua relação de compromisso entre suas características magnéticas e aplicação em processos de deposição. Os parâmetros usados foram: 1300 W de potência do Laser, Spot Size de 1,2 mm com Laser desfocado em Z + 35 mm, 300 mm/s de velocidade de varredura do Laser e 0,8 m/min de velocidade do arame que é um valor médio de velocidade de arame normalmente utilizados 0,5 à 1,5 m/min (Huang et al., 2022; Voigt et al., 2020). O comando CNC da máquina foi programado para realizar um cordão com comprimento de 30 mm. Portanto, o comprimento final esperado para o cordão é de 31,2 mm, uma vez que o feixe laser é posicionado no centro do arame deve-se adicionar metade do diâmetro do arame para cada um dos lados do cordão. O sistema provou-se robusto o suficiente, resultando em um cordão de $(31,15 \pm 0,35)$ mm. A Figura 5 apresenta em (a) os cordões depositados, que foram submetidos às medições, e em (b) um gráfico com a comparação do valor médio do comprimento dos cordões em relação ao valor esperado, com representação do erro na barra de erro plotada no gráfico.

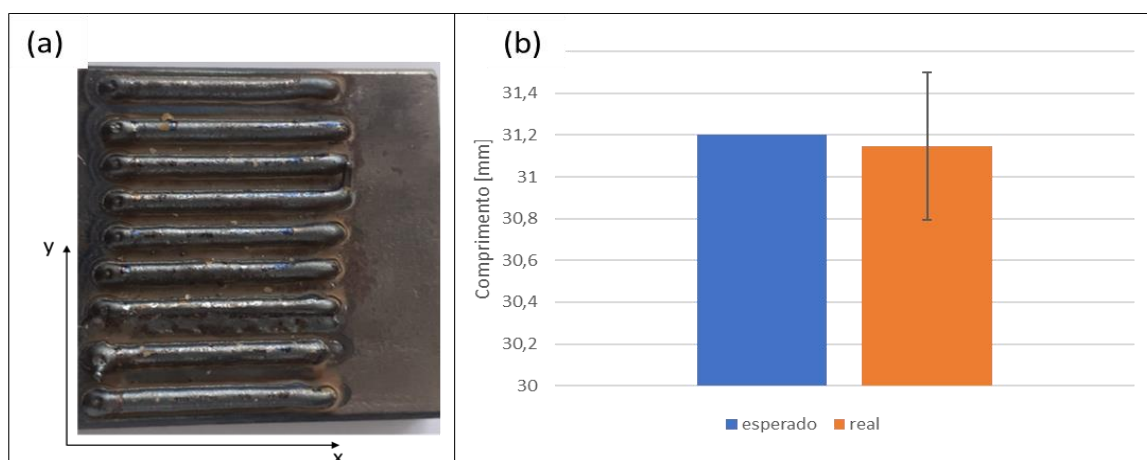


Figura 5. Cordões depositados (a) e resultado das medições (b)
(Os autores, 2022)

Outro fator analisado foi a capacidade do sistema mecânico e eletrônico de avanço de arame de realizar não só cordões, mas de revestimentos, uma vez que esse tipo de prática é a mais comum nas aplicações pretendidas para o sistema. Para isso, foi realizado um experimento de revestimento com 10 cordões com uma sobreposição de 30% entre eles. Como pode ser visto na Figura 6, houve um processo relativamente estável, embora ainda com algumas discontinuidades entre os cordões, mas essas discontinuidades podem ser resolvidas com um estudo melhor dos parâmetros a serem utilizados no processo, envolvendo principalmente ajustes na potência de emissão do laser e a velocidade de deposição.



Figura 6. Macrografia do revestimento
(Os autores, 2022)

Além das validações de deposições de material citadas anteriormente, para verificar a capacidade de controle de movimentação do arame, o dispositivo proposto foi testado em vazio, para uma condição de alimentação dinâmica, com o auxílio de um *encoder* resistivo acoplado no eixo de alimentação com a função de monitorar a qualidade de resposta de deslocamento do arame. Percebe-se que o sistema é capaz de mover-se para ambas as direções e não há variações bruscas da velocidade de alimentação tanto no período de avanço quanto no recuo do arame, proporcionando um processo com estabilidade no controle da alimentação dinâmica para estas condições de contorno. A Figura 7 apresenta os valores monitorados de deslocamento em relação ao tempo, plotados em um gráfico para validar a dinâmica de movimentação do arame.

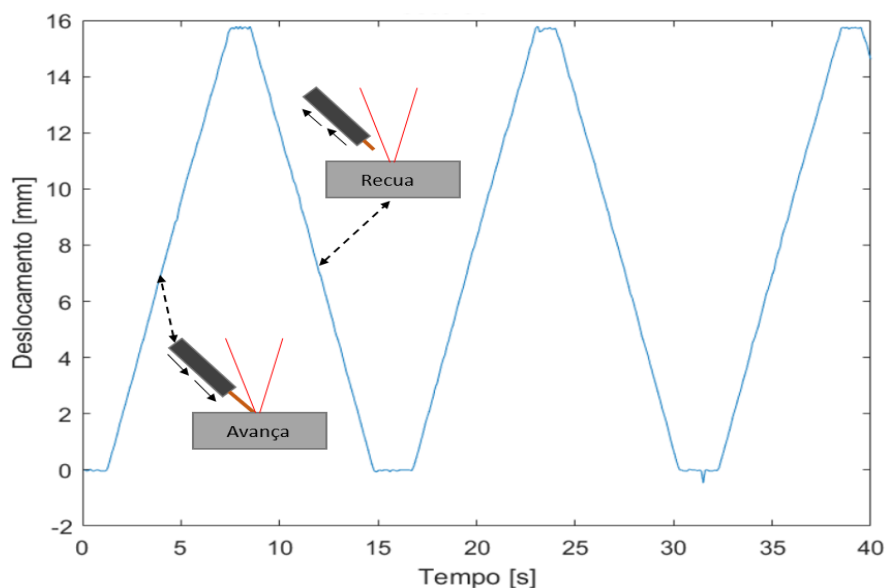


Figura 7. Validação do sistema de movimentação e alimentação de arame
(Os autores, 2022)

Após ser validado a rigidez do suporte de fixação do alimentador de arame e o processo de movimentação do arame, também foi avaliado o circuito de aquecimento indutivo quanto à sua capacidade de aquecer o arame. Essa avaliação foi realizada de duas formas diferentes, através de termografia e por medição indireta, usando termopares tipo K. A leitura do termopar foi realizada com o sistema de aquecimento já em regime permanente, sendo que a bobina de indução responsável pelo pré-aquecimento foi acionada usando os parâmetros: 12 A de corrente elétrica a uma frequência de 250 kHz e, após 2 minutos, foi realizada a medição encostando o termopar no arame aquecido, resultando em uma temperatura de $(473 \pm 2) ^\circ\text{C}$. Para a medição utilizando uma câmera térmica, o aquecimento foi filmado por 2 minutos e foram obtidas temperaturas em 3 posições do sistema (no meio da bobina, no final da bobina e no ambiente). Através da análise das imagens térmicas, bem como dos dados fornecidos pela câmera termográfica, foi gerado um gráfico com o perfil de temperatura desta aquisição, conforme pode-se observar na Figura 8.

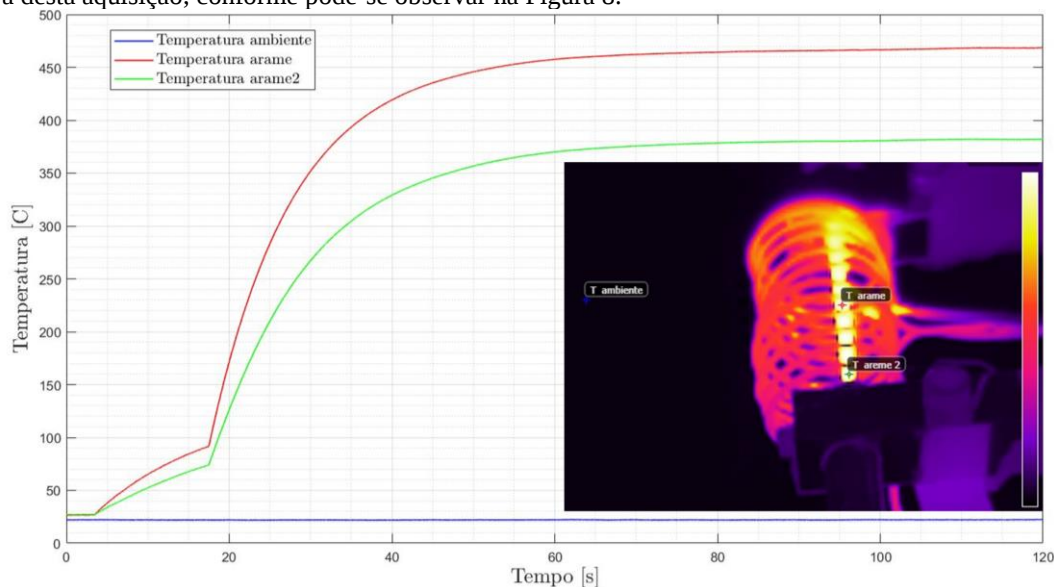


Figura 8. Validação do sistema de aquecimento indutivo
(Os autores, 2022)

Os valores de temperatura medidos e apresentados pelo sistema de aquecimento indutivo se mostram capazes de realizar o aquecimento do arame até valores aceitáveis para o processo de *hot-wire*. Na pesquisa de Voigt, Cunha, e Niño (2020), os autores propuseram um aquecimento indutivo para o pré-aquecimento de arame para o processo TIG, que utiliza arco elétrico, e foi utilizada uma fonte de corrente comercial da fabricante IMC, dedicada para aquecimento indutivo, e os valores de temperatura variaram de 100 a 700 graus Celsius. No trabalho de Huang et al. (2022), os autores

atingiram temperaturas de até 800 graus Celsius no pré-aquecimento de arame utilizando uma fonte de corrente controlada da empresa Fronius e aquecimento resistivo e não indutivo. Tais trabalhos aqui citados comprovam que o dispositivo de pré-aquecimento indutivo aqui proposto apresenta relevância quanto à sua capacidade de aquecimento e aplicação nos processos L-DED.

4. CONCLUSÕES

O alimentador de arame com aquecimento indutivo integrado proposto neste trabalho foi capaz de realizar deposições, conforme os ensaios executados. Portanto, percebe-se que o sistema é adequado e pode atingir todas as especificações técnicas necessárias nas deposições propostas. Também fornece a possibilidade de realizar revestimentos considerando os aspectos visuais e geométricos, entretanto recomenda-se uma otimização dos parâmetros de deposição, com análise de geração de descontinuidades, da adesão e da resistência química dos depósitos.

O aquecimento indutivo atingiu valores comuns de *hot-wire*, que giram entorno de 100 a 800 °C conforme apresentado nos trabalhos citados. Além disso, seus aspectos integrados, ou seja, capacidade de alimentar arame e pré-aquecer em um só dispositivo, traz uma grande aplicabilidade nos processos de deposição por L-DED.

Por fim, o sistema consegue ser facilmente intercambiável visto que apenas 4 parafusos precisam ser retirados para a troca entre os cabeçotes de pó e de arame, possibilitando boa intercambialidade entre sistemas e praticidade para o operador.

5. REFERÊNCIAS

- Back, N., Ogliari, A., Dias, A. e Silva, J.C. 2010. *Projeto integrado de produtos: planejamento, concepção e modelagem*. (p. 629). Editora Manole Ltda. Avenida Ceci, 672 Tamboré, Barueri, Brasil.
- Huang, W., Xiao, J., Chen, S., e Jiang, X. 2022. Control of wire melting behavior during laser hot wire deposition of aluminum alloy. *Optics and Laser Technology*, 150(February), 107978. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2022.107978>
- Kisielewicz, A., Thalavai Pandian, K., Sthen, D., Hagqvist, P., Bermejo, M. A. V., Sikström, F., e Ancona, A. 2021. Hot-Wire Laser-Directed Energy Deposition: Process Characteristics and Benefits of Resistive Pre-Heating of the Feedstock Wire. *Metals*, 11(4), 634. <https://doi.org/10.3390/met11040634>
- Peng, W., Jiguo, S., Shiqing, Z., e Gang, W. 2016. Control of wire transfer behaviors in hot wire laser welding. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 83(9–12), 2091–2100. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7696-8>
- Poprawe, R. 2011. *Tailored Light 2 : Laser Application Technology* (Reinhart Poprawe, Ed.). <https://doi.org/10.1007/978-3-642-01237-2>
- Segerstark, A. 2017. Laser Metal Deposition using Alloy 718 Powder Influence of Process. In *Materials Characterization* (Vol. 63). Retrieved from <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1161118/FULLTEXT02.pdf> <http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2017.03.073> <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2015.09.148> <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2018.01.015> <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018>
- Voigt, A. L., Cunha, T. V. da, e Niño, C. E. 2020. Conception, implementation and evaluation of induction wire heating system applied to hot wire GTAW (IHW-GTAW). *Journal of Materials Processing Technology*, 281(January), 116615. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.116615>
- Zhao, S., Xu, S., Huang, Y., e Yang, L. 2021. Laser hot-wire cladding of Ni/WC composite coatings with a tubular cored wire. *Journal of Materials Processing Technology*, 298(April), 117273. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2021.117273>

6. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.

DESIGN, IMPLEMENTATION AND EVALUATION OF WIRE FEEDING SYSTEM WITH INDUCTION HEATING APPLIED TO L-DED.

Manoel Kolling Dutra

Milton Pereira

Fellipe Augusto Filipim Lavaqui

Tiago Colvara Faria

LMP – Precision Engineering Laboratory – EMC – CTC - Universidade Federal de Santa Catarina Florianópolis CEP 88040-900 – Santa Catarina - Brasil

manoel.kolling@posgrad.ufsc.br

milton.pereira@ufsc.br

lavaquifellipe@gmail.com

tiagocf1208@gmail.com

Abstract. *The Laser Directed Energy Deposition (L-DED) process is a well-established industrial technique for precise coating deposition and additive manufacturing. Laser cladding aims to improve surface performance, thereby extending the life of many components in severe corrosive and abrasive wear environments. Wire laser cladding consists of feeding the deposited material with a metallic wire, which is fused by a laser energy source and manipulated over the deposition volume. This process shows some advantages over powder-based systems, such as cleaner processing environment, reduced environmental cost for wire production, better surface finish of the generated surface, no addition material waste, and a higher material deposition rate. Through innovative equipment, such as dedicated wire feeding systems and preheating techniques, customized manufacturing strategies can improve coating quality and productivity. Among recent innovations, preheating the wire results in lower energy rates delivered by the laser. This type of heating is called hot-wire heating. Hot-wire is well known in arc welding, where its synchronization with the arc's electrical parameters provides a dramatic increase in metal transfer stability and controllability. Based on this, the present paper addresses the development of a wire feeder with integrated induction heating, from which a geometric characterization of the deposited strands and a characterization of the wire heating temperature profile with thermographic imaging measurement was performed to validate the developed device and its peripherals regarding deposition stability.*

Keywords: L-DED; cladding; hot-wire; inductive heating.

RESPONSIBILITY NOTICE

The author(s) is (are) the only responsible for the printed material included in this paper.