

DEPOSIÇÃO DE ENERGIA DIRECIONADA DE ALTA VELOCIDADE PARA APLICAÇÕES EM MOLDES E FERRAMENTAS: OPORTUNIDADES PARA A INDÚSTRIA PORTUGUESA DE MOLDAGEM

Mehmet Cagirci¹, Shubham Chandra¹, Paulo J. G. Bartolo^{1, 2}, Rui Tocha³, Rui Soares³, Luís Dias³,

¹ Centro de Impressão 3D de Singapura (SC3DP), Universidade Tecnológica de Nanyang, Singapura

² Escola de Engenharia Mecânica e Aeroespacial, Universidade Tecnológica de Nanyang, Singapura

³ Centro Tecnológico da Indústria de Moldes, Ferramentas Especiais e Plásticos (CENTIMFE)

Portugal é reconhecido internacionalmente como um centro de referência para o fabrico de moldes, sendo o terceiro maior produtor europeu e o oitavo mundial, com o cluster altamente competitivo nas regiões da Marinha Grande e de Oliveira de Azeméis, que exportam soluções chave-na-mão, sobre a sua marca coletiva “Engineering & Tooling from Portugal”, para os setores automóvel, embalagens, dispositivos médicos, e de bens de consumo. Neste ambiente competitivo, o sucesso depende cada vez mais da capacidade de combinar o conhecimento empírico em produção de moldes, com tecnologias de fabrico avançadas que ampliam a precisão, reduzem os prazos de entrega, prolongam a vida útil dos moldes e melhoram a robustez dos processos produtivos. Entre as tecnologias emergentes, o fabrico aditivo de metais (AM) passou da prototipagem para a prática industrial. Em particular, a Deposição Direta de Energia (DED) estabeleceu-se como um processo poderoso para fabricar, reparar e modificar ferramentas, como matrizes e moldes de alto valor. Mais recentemente, variantes de alta velocidade do DED, frequentemente referidas como Deposição de Metal a Laser de Alta Velocidade (HS-LMD) ou Deposição de Material a Laser de Velocidade Extrema (EHLA), abriram novas possibilidades para revestimentos finos, de alta qualidade e alto desempenho, com redução drástica na zona termicamente afetada [1–4]. Este artigo explica os fundamentos do DED e do DED de alta velocidade, e fornece aplicações relacionadas, e caminhos de transposição tecnológica para a indústria de moldes e ferramentas. São identificados dois casos de estudo ilustrativos, definidos por investigadores do Joint Lab SC3DP–CENTIMFE (Singapura–Portugal), sobre a aplicação DED de alta velocidade em insertos moldantes para injeção, visando demonstrar uma aplicação realista e destacar tanto os benefícios como os desafios de implementação.

DEPOSIÇÃO DIRETA DE ENERGIA

A deposição direta de energia é um dos processos de Fabrico Aditivo (FA) de metal mais utilizados para aplicações industriais devido ao seu potencial para atingir altas taxas de deposição de material sem afetar severamente as propriedades do material. No DED, um laser de alta potência funde a matéria-prima metálica, como pó ou fio, à medida que é depositada num substrato.

A matéria-prima é normalmente transportada por um gás inerte através de um bocal coaxial ou lateral em sistemas de sopro de pó, enquanto os sistemas alimentados por fio requerem apenas blindagem de gás inerte. O laser forma uma pequena piscina de fusão localizada na superfície da peça de trabalho. À medida que o bocal se move seguindo o código G, ou o modelo de desenho assistido por computador (CAD), o material é depositado de forma controlada, seja camada por camada ou varrimento a varrimento. Ao contrário da fusão em leito de pó (PBF), que requer que os componentes sejam totalmente construídos dentro de um leito de pó dentro de uma câmara fechada, a DED opera num ambiente com proteção atmosférica local enquanto purga o gás de proteção. Esta característica torna o DED particularmente atraente para depositar material diretamente em substratos ou componentes existentes. As aplicações típicas em ferramentas e na indústria pesada, incluem a reparação de matrizes desgastadas, a reconstrução de áreas danificadas em moldes, a regeneração de eixos e rolos e a fabricação de revestimentos funcionais que melhoram o desgaste, a corrosão ou o desempenho em altas temperaturas dos componentes.

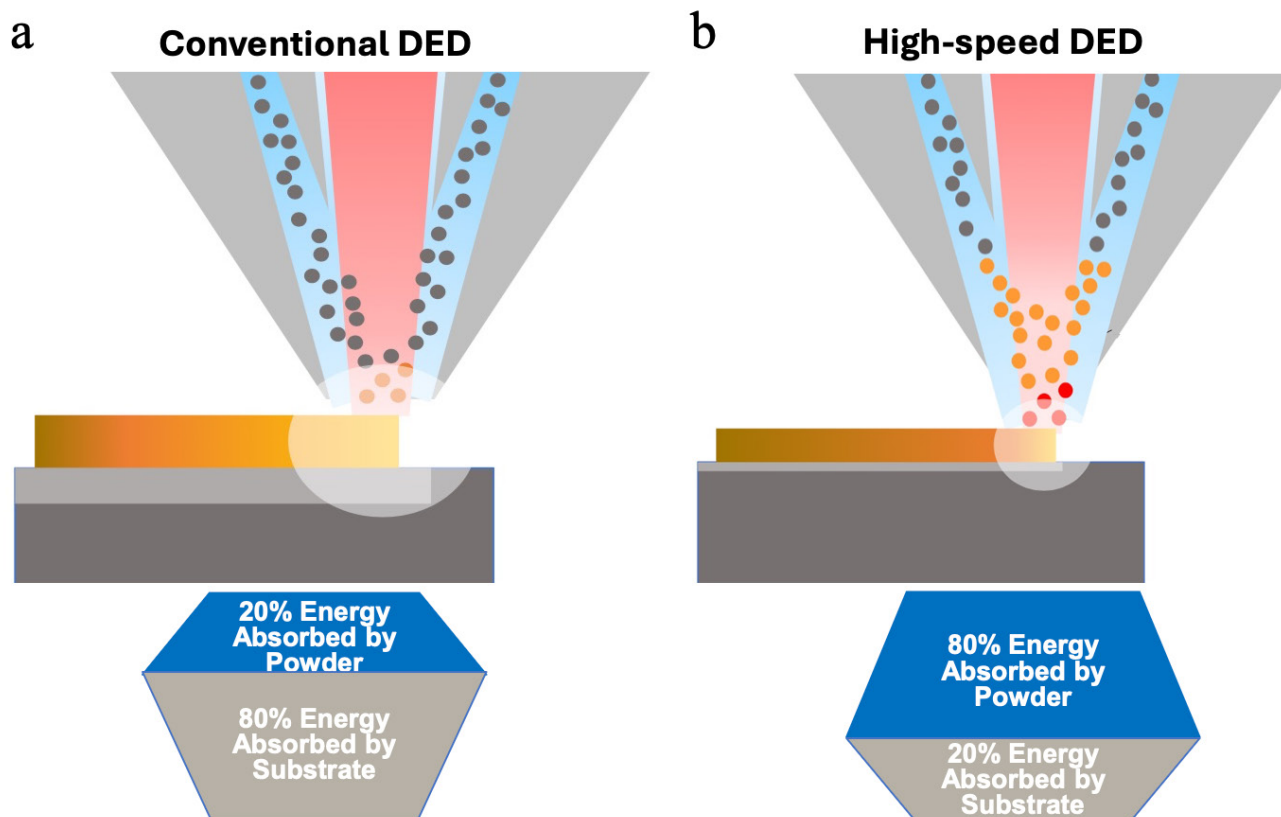
O DED oferece três capacidades principais para ferramentas, matrizes e moldes. Primeiro, permite a reparação de danos localizados ou perda de material sem perda total da ferramenta. Segundo, permite a melhoria do desempenho local através da aplicação de materiais personalizados em regiões críticas, como ligas resistentes ao desgaste ou à corrosão em superfícies moldantes [1–3,5,6]. O DED de alta velocidade oferece vantagens excepcionais para tais aplicações de revestimento [5–7]. Em terceiro lugar, a DED suporta abordagens de fabrico híbridas, nas quais a maquinaria convencional, conhecida como fabrico subtrativo, é combinada com, ou seguida por fabrico aditivo. Algumas plataformas DED integram processos aditivos e subtrativos num único sistema, minimizando os requisitos de pós-processamento e encurtando os prazos de entrega dos componentes. Estas capacidades permitem fabricar e manter ferramentas e moldes altamente complexos, personalizados e de substituição dispendiosa.

DED de alta velocidade

O DED a laser convencional com pó, opera normalmente a velocidades de alguns metros por minuto, com o pó soprado para dentro ou sobre o feixe de laser próximo à superfície do substrato a partir de distâncias fixas ou variáveis (Figura 1a). As marcas de fusão resultantes têm geralmente espessuras da ordem de várias centenas de micrômetros, com base no tamanho do ponto e no perfil do feixe do laser. Embora estes depósitos sejam geralmente sólidos e sem defeitos, a entrada de calor relativamente elevada pode gerar zonas afetadas pelo calor e tensões residuais significativas. Isto pode ser problemático para os moldes, particularmente devido ao aumento da fragilidade ou à redução da maquinabilidade. O DED de alta velocidade modifica a interação entre o laser, o pó e o substrato. Nos sistemas DED de alta velocidade (HS-LMD) e EHLA, as partículas de pó são aquecidas até um estado quase fundido, enquanto ainda interagem com o feixe de laser a uma distância do substrato (Figura 1b). Como resultado, as partículas são depositadas na peça de trabalho em menos tempo, absorvendo menos energia, o que permite que o processo opere a velocidades de digitalização significativamente mais altas. Consequentemente, os depósitos são formados como camadas finas e contínuas, com entrada de calor reduzida por unidade de área.

As principais diferenças entre o DED convencional, o DED de alta velocidade e o EHLA estão resumidas conceitualmente na

Tabela 1, na qual as tecnologias disponíveis comercialmente não se limitam aos equipamentos listados. O DED de alta velocidade opera a velocidades que variam de dezenas de metros por minuto a mais de cem metros por minuto em sistemas EHLA especializados, em comparação com os poucos metros por minuto típicos da deposição de metal a laser convencional. As camadas depositadas são mais finas e uniformes, proporcionando normalmente revestimentos da ordem de cem micrômetros por passagem, com excelente qualidade de superfície após um mínimo de maquinação. Mais importante ainda para aplicações em moldes e ferramentas, a carga térmica geral é significativamente reduzida. A piscina de fusão menor e o movimento rápido confinam a zona afetada pelo calor e limitam substancialmente a distorção [5–7]. Esta é uma vantagem crítica ao processar aços pré-endurecidos para ferramentas, superfícies de cavidades polidas ou insertos que não podem ser submetidos a um tratamento de reaquecimento completo. Estas características posicionam o DED de alta velocidade como uma tecnologia de revestimento e deposição de camadas finas com forte potencial para a fabricação de moldes e matrizes. Combina os benefícios metalúrgicos de um revestimento totalmente fundido com taxas de deposição e controlo térmico além das capacidades da soldadura convencional ou da deposição de revestimentos duros.



// Figura1. Representação esquemática das tecnologias (a) DED convencional e (b) DED de alta velocidade.

Tabela1. Comparação entre as tecnologias DED convencional, DED de alta velocidade e EHLA em termos de aplicação em ferramentas, principais características, física do processo e equipamentos/sistemas disponíveis comercialmente.

Processo	Aplicação em ferramentas	Principais características	Física do processo	Tecnologias comercializadas
DED (DED a laser convencional / LMD)	Reparação de regiões desgastadas; reconstrução de zonas danificadas; fabricação híbrida combinanda com maquinação	Velocidades de deslocamento moderadas; piscina de fusão induzida por laser no substrato; matéria-prima soprada em pó ou alimentada por fio; atmosfera aberta ou localmente protegida	A matéria-prima é injetada na piscina de fusão gerada pelo laser ou perto dela e dá-se a solidificação faixa por faixa; a entrada de calor relativamente alta leva a zonas termicamente afetadas (ZTA) mais amplas e tensões residuais que devem ser tratadas.	Sistemas Optomec LENS; plataformas híbridas DMG MORI LASERTEC DED; soluções TRUMPF Laser Metal Deposition
HS-DED (DED de alta velocidade / HS-LMD)	Revestimentos finos e reforço local de inserções e núcleos de moldes; reparação onde a redução da distorção é crítica	Movimento dinâmico mais elevado e controlo de energia mais rigoroso do que o DED convencional; deposição tipicamente à base de pó; concebido para camadas mais finas e uniformes com penetração térmica reduzida.	A interação modificada entre laser, pó e substrato permite depósitos mais finos e menor entrada de calor por unidade de área em comparação com o DED convencional, mantendo a ligação metalúrgica	Makino AML500 (plataforma LMD de cinco eixos para revestimento, reparação e construção de características); configurações LMD de alta velocidade em plataformas CNC híbridas
Extreme HS-DED (EHLA)	Revestimentos de grande área e alto rendimento com impacto térmico mínimo; engenharia de superfície de componentes de alto valor	Velocidades de deslocamento muito altas; bicos coaxiais especializados que permitem o aquecimento das partículas antes do impacto no substrato (conceito de "fusão no ar"); otimizado para revestimento em vez de acumulação em massa	Aç partículas de pó são aquecidas até um estado quase fundido em projeção antes de entrarem em contacto com o substrato, permitindo a formação de revestimentos finos e densos com uma poça de fusão rasa e uma zona termicamente afetada (ZTA) fortemente confinada	Plataformas de deposição a laser com tecnologia EHLA da TRUMPF derivadas dos desenvolvimentos do Fraunhofer ILT

SISTEMA DED DE ALTA VELOCIDADE NO SC3DP

O sistema Makino AML500 foi concebido para colmatar a lacuna entre a investigação científica e a manutenção de fabrico industrial de moldes. Apresenta um volume de trabalho de 500 × 400 × 400 mm (X/Y/Z) e um sistema de movimento altamente dinâmico capaz de velocidades de deslocamento superiores a 20 m/min, o que é significativamente mais rápido do que os 1-2 m/min típicos do DED convencional. O sistema está equipado com um laser de fibra de 4 kW e um diâmetro focal do laser variável de 1,0 a 3,2 mm. Um bico coaxial especializado permite a fusão das partículas de pó antes de atingir a piscina de fusão, seguindo o princípio de «fusão no ar» característico do HS-LMD. Esta configuração permite a deposição de camadas finas, ligadas metalurgicamente, com penetração térmica mínima no substrato. A plataforma suporta a alternância contínua entre revestimento, reparação e acumulação de características em superfícies tridimensionais complexas, sincronizando o controlador CNC Sinumerik ONE com um alimentador de pó de dupla tremonha que opera a taxas de fluxo de 3–60 g/min. Esta combinação de alta velocidade e controlo preciso da energia é fundamental para o processamento de aços para ferramentas sensíveis ao calor, como os aços H13 ou maraging, sem induzir fissuras ou distorções comumente associadas aos processos tradicionais de soldadura [1].

APLICABILIDADE DO DED/HS-DED EM MOLDES E MATRIZES

Os moldes utilizados para injeção termoplástica, moldação por compressão e fundição sob pressão operam sob combinações severas de cargas térmicas, mecânicas e químicas. As superfícies das cavidades e detalhes locais são expostas a altas pressões, gradientes de temperatura, polímeros fundidos abrasivos ou reforçados com fibras e, em muitos casos, ambientes corrosivos. Os mecanismos de falha dominantes incluem desgaste abrasivo e adesivo, fadiga térmica e fissuras por calor, fissuras locais e corrosão em canais de refrigeração ou regiões de baixo fluxo. Para além de uma crescente complexidade técnica, as OEMs e os clientes, exigem um time-to-market cada vez mais curto, alterações frequentes de engenharia e maior vida útil das ferramentas. As abordagens de reparação convencionais empregadas pelos fabricantes de moldes normalmente dependem de soldadura TIG ou a laser usando varetas de enchimento, seguidas por remanufatura extensiva e polimento manual. Embora bem estabelecidos, esses métodos muitas vezes introduzem tensões residuais e distorções significativas, particularmente em aços endurecidos, exigindo etapas adicionais de pós-processamento, como têmpera local ou tratamento térmico de alívio de tensões.

O DED demonstrou eficácia em vários setores para reparar e modificar componentes fabricados por vias convencionais e aditivas. Estudos sobre matrizes e ferramentas de conformação mostram que, quando os parâmetros do processo, a seleção da liga e os tratamentos pós-aquecimento são controlados adequadamente, as regiões reparadas podem alcançar ou exceder os requisitos de desempenho originais. Análises económicas indicam ainda

que, para ferramentas grandes e de alto valor, a reparação baseada em DED pode reduzir substancialmente os custos e os prazos de entrega em comparação com a substituição completa da ferramenta.

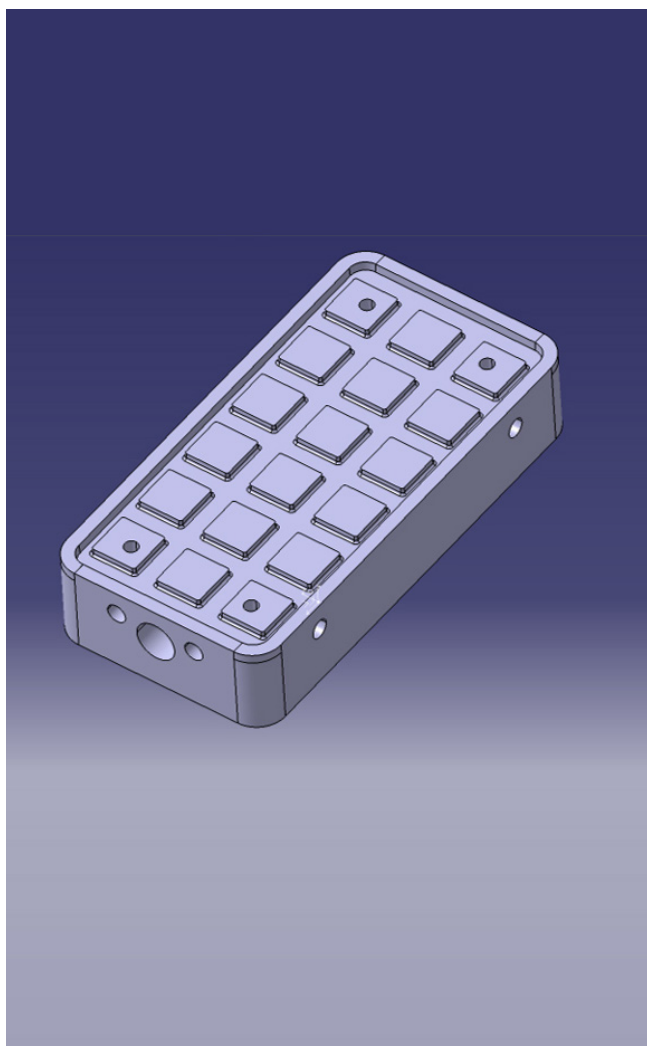
O DED de alta velocidade reforça ainda mais esta proposta de valor para a indústria de moldes. As capacidades acima mencionadas proporcionam vantagens técnico-económicas significativas, particularmente para insertos e superfícies de moldes de injeção, onde as tolerâncias dimensionais são rigorosas e as superfícies requerem um polimento de alta qualidade. Utilizando o DED de alta velocidade, os fabricantes de moldes podem reforçar zonas de alto desgaste, introduzir superfícies resistentes à corrosão e melhorar localmente o desempenho, sem modificar a maior parte da ferramenta.

Em termos de materiais, o DED de alta velocidade pode processar muitos aços comumente usados na fabricação de moldes. Os aços para ferramentas de trabalho a quente, como o H13, os aços maraging para insertos de alto desempenho e os tipos de ferramentas resistentes à corrosão desenvolvidos especificamente para deposição de metal a laser, foram amplamente estudados [1,8]. Além disso, a investigação sobre materiais com gradação funcional produzidos através de DED demonstra a viabilidade de adaptar localmente a dureza, a condutividade térmica e a resistência à corrosão. Esta capacidade é particularmente relevante para moldes de injeção otimizados termicamente com características de arrefecimento conformado. Além das ligas de ferramentas convencionais e dos materiais com classificação funcional, as ligas de alta entropia (HEAs) têm atraído recentemente uma atenção significativa para o processamento baseado em DED devido à sua flexibilidade de composição e resistência excepcional ao desgaste, corrosão e degradação térmica. Está demonstrado que vários sistemas HEA mantêm microestruturas estáveis e desempenho mecânico favorável sob as condições de solidificação rápida inerentes ao DED de alta velocidade, tornando-os candidatos promissores para aplicações de engenharia de superfície [9]. A capacidade do DED de depositar localmente HEAs permite ainda a melhoria específica de componentes de moldes, particularmente em regiões expostas a ciclos térmicos severos ou polímeros fundidos agressivos. À medida que a investigação continua a amadurecer, as HEAs são cada vez mais vistas como materiais de revestimento e reparação de última geração que podem complementar ou superar os aços convencionais para ferramentas em ambientes de moldação exigentes.

Para a indústria portuguesa de moldes e plásticos, que compete globalmente em termos de qualidade e desempenho, o DED de alta velocidade representa uma tecnologia estratégica facilitadora. Oferece uma via para prolongar a vida útil das ferramentas, diferenciar a oferta de serviços e alinhar-se com os objetivos de sustentabilidade, permitindo múltiplos ciclos de reparação em vez da substituição pontual de componentes de moldes [10].

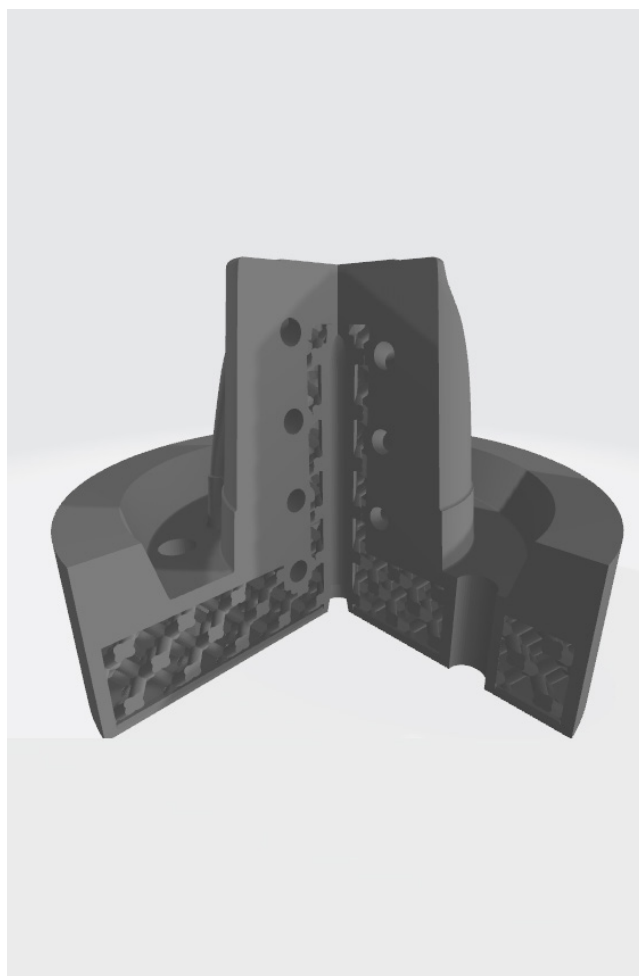
PERSPETIVA DE IMPLEMENTAÇÃO DA TECNOLOGIA HS-DED PARA O CLUSTER ENGINEERING AND TOOLING PORTUGUÊS

Para apoiar a adoção industrial do DED de alta velocidade no cluster Engineering and Tooling português, o Joint Lab CENTIMFE-SC3DP está a realizar investigação direcionada e orientada para a aplicação industrial, com o objetivo de abordar os desafios práticos de reparação e melhoria de superfícies observados nas ferramentas industriais. Os casos de estudo preliminares atuais centram-se, (1) na reparação de insertos de moldes utilizando aço para ferramentas H13 depositado em substratos pré-maquinados que replicam cenários realistas de danos e desgaste, bem como na aplicação de revestimentos de liga de alta entropia (HEA) para melhorar localmente o desempenho mecânico em regiões críticas (Figura 2).



// Figura 2 . Caso de estudo (1)

Em paralelo, o Joint Lab está a avaliar num segundo caso de estudo (2), estratégias alternativas de materiais e vias sequenciais de fabrico aditivo que combinam múltiplas tecnologias de FA, tais como a fusão a laser em leito de pó (LPBF) e o DED de alta velocidade, com o objetivo de permitir fluxos de trabalho de fabrico e reparação mais sustentáveis, flexíveis e industrialmente relevantes (Figura 3).



// Figura 3 . Caso de estudo (2)

Adicionalmente, importa salientar que estes casos de estudo acima referidos se encontram atualmente em fase de desenvolvimento no âmbito das atividades de investigação do Joint Lab CENTIMFE-SC3DP. À medida que os resultados experimentais forem sendo consolidados, estes servirão de base para a elaboração de trabalhos técnicos mais detalhados, que serão apresentados em futuros artigos na revista O Molde. Esses artigos irão aprofundar os aspetos científicos e tecnológicos associados às estratégias de reparação, seleção de materiais, desempenho das superfícies depositadas e integração de diferentes tecnologias de fabrico aditivo em contextos industriais reais.

O DED de alta velocidade deve ser considerado não como um tema de investigação distante, mas como uma tecnologia que se aproxima da maturidade industrial para as empresas do cluster Engineering and Tooling português. Além do esforço de investigação em curso realizado no Joint Lab SC3DP-CENTIMFE, várias considerações estratégicas podem orientar a sua adoção. Em primeiro lugar, devem ser identificados os componentes de moldes que apresentam falhas localizadas recorrentes ou padrões previsíveis de desgaste e corrosão. Insertos com canais de injeção de alta resistência ao cisalhamento, cargas abrasivas ou polímeros corrosivos são candidatos naturais, assim como buchas e cavidades que operam a temperaturas elevadas ou sujeitos a mudanças frequentes de design.

Em segundo lugar, as estratégias de investimento devem ser cuidadosamente avaliadas. Para grandes fabricantes de moldes com volumes substanciais de reparação pode justificar a aquisição interna de plataformas híbridas de DED-maquinação. As pequenas e médias empresas podem, em vez disso, beneficiar da colaboração com prestadores de serviços, universidades e centros tecnológicos, como o CENTIMFE, para aceder a capacidades de DED de alta velocidade, desenvolvendo conhecimentos em design para reparação e inspeção digital através do Joint Lab CENTIMFE-SC3DP.

Em terceiro lugar, a integração com simulação e metrologia é essencial. Os projetistas de moldes já contam com a engenharia assistida por computador para otimizar circuitos de refrigeração, prever o comportamento de enchimento e reduzir a deformação. Estender esse fluxo de trabalho digital para incluir simulação do processo DED, previsão de distorção e controle da espessura do revestimento ajudará a quantificar os benefícios da aplicação DED de alta velocidade e acelerar a qualificação industrial. Por fim, devem ser desenvolvidas normas internas para a qualificação de componentes reparados e revestidos por DED. Estas incluem normalmente testes mecânicos e testes de ligas depositadas, avaliação não destrutiva de regiões reparadas e ensaios de produção controlados. Tais normas são essenciais para garantir a confiança do cliente no desempenho e na fiabilidade de ferramentas reparadas ou híbridas.

CONCLUSÃO

A deposição de energia direta de alta velocidade é uma tecnologia promissora para o cluster de moldes e ferramentas devido à sua capacidade excepcional de prolongar a vida útil das ferramentas e fornecer soluções de reparação de alta qualidade para moldes e matrizes desgastados, com impactos positivos nos produtos finais. A adoção de sistemas HS-DED de última geração é particularmente relevante para a indústria de moldação portuguesa, que compete globalmente em qualidade, inovação e desempenho de entrega. Com base na experiência industrial adquirida com o DED convencional na reparação de moldes e na fabricação híbrida, o DED de alta velocidade oferece uma produtividade substancialmente maior, revestimentos mais finos e de maior qualidade e um reduzido impacto na zona termicamente afetada.

Plataformas industriais como a Makino AML500 demonstram que o DED de alta velocidade pode ser integrado em centros de maquinação híbridos de cinco eixos que se alinham naturalmente com os fluxos de trabalho existentes na área fabril. Quando combinados com inspeção digital, simulação de processos e técnicas avançadas de pós-processamento, como polimento a laser, estes sistemas suportam uma abordagem mais sustentável, circular e orientada por dados para a gestão do ciclo de vida das ferramentas. É neste contexto, que o CENTIMFE se propõe investir e integrar na sua oferta mais esta tecnologia de ponta de FA, no quadro da candidatura que apresentou do projeto ADDITIVE X, liderado pela EROFIO, em que o CENTIMFE é copromotor, no âmbito do PT2030.

Em resumo, o DED de alta velocidade não se destina a substituir a maquinação e a soldadura convencionais, mas a complementá-las. Este fornece uma solução eficaz para gerir as regiões mais críticas de moldes e insertos. Ao iniciar aplicações-piloto bem definidas, promover parcerias e investir no desenvolvimento de competências, a indústria portuguesa de moldes e plásticos pode posicionar-se na vanguarda desta evolução tecnológica e reforçar o seu papel como referência global.

REFERÊNCIAS

- [1] Chandra S., et al. (2025). *Otimização dos parâmetros do processo para o fabrico de precisão de aço para ferramentas H13 através da deposição de energia direcionada por laser*. *J. Manuf. Process.*, 149, (12–26).
- [2] Saboori, A., et al. (2019). «Aplicação da fabricação aditiva baseada na deposição de energia direcionada na reparação e remanufatura.» *Applied Sciences*, 9(16), 3316.
- [3] Shamsaei, N., et al. (2015). «Visão geral da fabricação aditiva para peças resistentes à fadiga.» *International Journal of Fatigue*, 76, 3-35.
- [4] Zhang, Y., et al. (2021). «Investigação experimental e numérica na deposição de energia direcionada para reparação de componentes.» *Revista de Processos de Fabricação*, 64, 56-72.
- [5] Schippel, T., et al. (2017). «Deposição de material a laser de alta velocidade extrema (EHLA) – Um novo processo para revestimento e reparação.» *Relatório Anual Fraunhofer ILT*.
- [6] Li, M., et al. (2019). «Deposição de material a laser de alta velocidade extrema (EHLA) de aço AISI 4340.» *Coatings*, 9(12), 778.
- [7] Yuan, W., et al. (2021). «Estabilidade do processo e qualidade do revestimento na deposição de material a laser em velocidade extremamente alta.» *Tecnologia de superfícies e revestimentos*, 405, 126582.
- [8] Åsberg, M., et al. (2019). «Influência do tratamento térmico posterior na microestrutura e nas propriedades mecânicas do aço para ferramentas H13 depositado por DED.» *Ciência e Engenharia de Materiais: A*, 748, 27-36.
- [9] Zhang, W., et al. (2022). «Ligas de alta entropia fabricadas por aditivos: uma revisão da microestrutura e propriedades.» *Materiais e Design*, 220, 110875.
- [10] Walder, G., et al. (2022). «Avaliação do ciclo de vida de um estudo de caso de circularidade utilizando manufatura aditiva.» *Sustentabilidade*, 14(16), 10123.