

AVALIAÇÃO DA EFICÁCIA DE UM SISTEMA DE DEFLEXÃO PNEUMÁTICA (AIR KNIFE) NA PRESERVAÇÃO DE COMPONENTES ÓPTICOS EM PROCESSOS DE SOLDAGEM A LASER

Elton Eduardo Fissmer¹, Natália Wendt Dreveck¹, Henrique Nardon Ferraresi¹, Guilherme de Faveri¹, Bethina Vaz Nicocelli¹, João Alberto Günther Neto¹, Fernanda Correa¹, Gabriel Almeida de Aguirre¹, Andre Luis Piva Maran¹

¹Instituto SENAI de Inovação em Processamento a Laser

1. Introdução

Na soldagem a laser industrial de alta potência, a eficiência do processo está diretamente ligada à disponibilidade operacional da célula robótica e à integridade dos componentes ópticos. Durante a soldagem, a intensa interação entre o feixe laser e o *keyhole* gera uma ejeção contínua de vapores e respingos metálicos [1]. Sem a proteção adequada, esses ejetos atingem o vidro de proteção do cabeçote, causando danos irreversíveis à superfície óptica. Na linha de produção, a degradação desse consumível resulta em custos elevados, não apenas pelo valor unitário da peça, mas principalmente pelas paradas frequentes para manutenção corretiva e substituição. Além disso, a contaminação progressiva do vidro reduz a qualidade da solda ao provocar a desfocagem do feixe por absorção térmica [2]. Para mitigar esses impactos, o uso de um sistema de *air knife* torna-se uma solução viável. Este dispositivo atua como uma barreira pneumática de alta velocidade que desvia os ejetos antes que atinjam a óptica, prolongando a vida útil do consumível e garantindo a estabilidade do processo. Este trabalho avalia, por meio de videografia de alta velocidade e análise de imagem, a eficácia de um sistema *air knife* fabricado por impressão 3D na deflexão de respingos em soldagem laser de chapas de aço zincado, quantificando a redução de partículas na região crítica do componente óptico.

2. Experimento

Os ensaios foram realizados utilizando uma fonte laser de fibra IPG YLR-300 com potência de 2500 W e velocidade de soldagem de 220 mm/s, sobre chapas de aço zincado em junta sobreposta, configuração amplamente empregada na indústria automobilística. Esta escolha justifica-se pela severidade na geração de ejetos: o baixo ponto de ebulição do zinco em relação à temperatura de fusão do aço promove a expansão violenta de vapores metálicos durante a formação do *keyhole*, resultando em projeções de respingos em alta velocidade [3]. Para a captura da dinâmica dos ejetos, utilizou-se uma câmera de alta velocidade operando a 500 fps, posicionada lateralmente ao cabeçote de soldagem e equipada com filtros ópticos para mitigar a luminosidade do processo. Foram comparadas duas condições operacionais: (a) soldagem sem assistência do *air knife* e (b) soldagem com o sistema de *air knife* acionado. O sistema é composto por três saídas de ar comprimido dispostas a 45° em relação ao eixo óptico, operando a 5 bar, criando uma barreira pneumática entre a zona de processo e o vidro de proteção do cabeçote.

Para a análise semiquantitativa dos ejetos, estabeleceu-se uma linha horizontal de controle a 300 mm abaixo do vidro de proteção, visível nas imagens capturadas. As imagens extraídas entre $t = 0$ e $t = 200$ ms, em intervalos de 25 ms, foram processadas no software MATLAB mediante conversão para escala de cinza, binarização por *threshold* e identificação de componentes conectados via algoritmo de *flood fill*, obtendo-se o número de partículas acima da linha de controle em cada condição.

3. Resultados e Discussão

Os resultados obtidos através da análise dos vídeos de alta velocidade revelaram comportamentos distintos na dinâmica dos ejetos. Na condição sem o uso do *air knife*, observou-se que as explosões de vapor de zinco projetam respingos em trajetórias ascendentes diretas, atingindo a região do vidro de proteção. Em

contrapartida, com a utilização do *air knife*, o fluxo de ar comprimido atuou como uma barreira física, desacelerando e defletindo as partículas lateralmente antes de atingirem a zona crítica superior. A Figura 1 ilustra qualitativamente esses comportamentos, evidenciando a deflexão lateral dos respingos abaixo da linha de controle com o *air knife* acionado.

A Figura 2 apresenta a evolução temporal do número de partículas detectadas acima da linha de controle. Sem o *air knife*, observa-se uma tendência crescente e irregular, partindo de 5 partículas em $t = 0$ ms e atingindo o pico de 40 partículas em $t = 200$ ms, evidenciando o acúmulo progressivo de respingos em direção ao vidro de proteção. Com o *air knife* acionado, o número de partículas foi nulo em 7 dos 9 instantes analisados, com ocorrências isoladas de 1 partícula em $t = 0$ ms e $t = 100$ ms, possivelmente associadas à instabilidade transiente do fluxo de ar no início do processo. A redução média foi de 97%, com proteção completa a partir de $t = 25$ ms.

Essa expressiva redução no volume de respingos que alcançam o vidro de proteção justifica o investimento no sistema, uma vez que a contaminação da óptica é o principal fator de instabilidade em processos de soldagem de chapas zincadas [2]. A preservação do vidro evita paradas não programadas para limpeza ou substituição de consumíveis de alto custo, otimizando o OEE (*Overall Equipment Effectiveness*) da célula de soldagem.

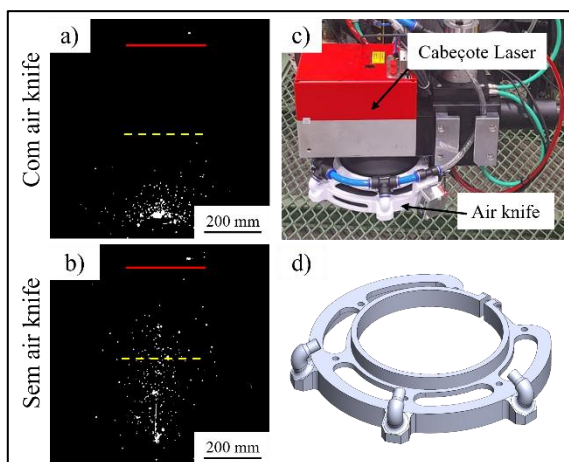


Fig. 1. Soldagem a laser de aço zincado em junta sobreposta: (a) sem air knife, respingos ultrapassam a linha de controle (- - -) e atingem o vidro de proteção (—); (b) com air knife, respingos defletidos abaixo da linha de controle; (c) setup experimental; (d) modelo CAD do air knife com três saídas a 45°.

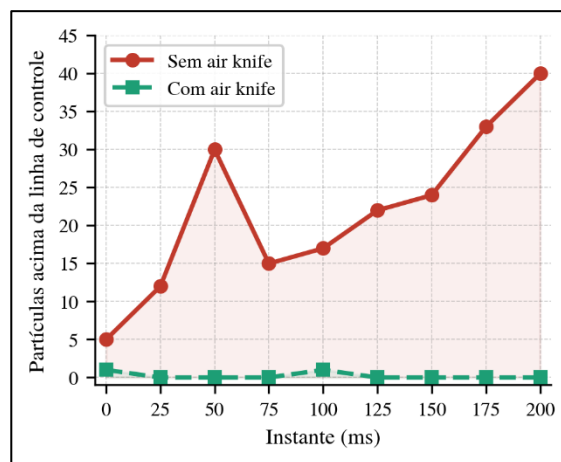


Fig. 2. Evolução temporal do número de partículas detectadas acima da linha de controle por videografia de alta velocidade (500 fps), nas condições sem e com acionamento do sistema air knife.

4. Referências

- [1] A. F. H. Kaplan, *Spatter in laser welding*, Journal of Laser Applications, **23**, 032005, (2011).
- [2] M. Hemmerich, C. Thiel, T. Graf, *Reduction of Focal Shift Effects in Industrial Laser Beam Welding by Means of Innovative Protection Glass Concept*, Physics Procedia, **56**, 681–688, (2014).
- [3] P. Norman, H. Engström, A. F. H. Kaplan, *Novel measures for spatter prediction in laser welding of thin-gage zinc-coated steel*, International Journal of Heat and Mass Transfer, **175**, (2021).

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Instituto SENAI de Inovação em Processamento a Laser pelo suporte técnico e infraestrutura disponibilizados para a realização deste trabalho.