

16º Congresso de Inovação, Ciência e Tecnologia do IFSP - 2025

INVESTIGAÇÃO DOS IMPACTOS CAUSADOS NA DUREZA DO AÇO AISI M2 PRODUZIDO POR DED-LB: Efeito da Potência do Laser

RAYANE K. F. VIEIRA¹, MARCOS A. FONTES²

¹ Graduanda em Engenharia Mecânica, Bolsista PIBIFSP, IFSP, Campus Sertãozinho, f.rayane@aluno.ifsp.edu.br.

² Docente, IFSP, Campus Sertãozinho, marcos.fontes@ifsp.edu.br

Área de conhecimento (Tabela CNPq): 3.03.00.00-2 Engenharia de Materiais e Metalúrgica

RESUMO: Este estudo teve como objetivo investigar os impactos causados na dureza do aço rápido AISI M2 produzido pela técnica de manufatura aditiva Directed Energy Deposition – Laser Beam (DED-LB), com foco na influência da potência do laser. A escolha do aço M2 se justifica por suas excelentes propriedades de dureza, porém sua fabricação por DED-LB apresenta desafios, o que torna a otimização desse processo crucial. Os procedimentos adotados para este estudo consistem na análise do material fornecido pela empresa Höganäs AB Inc, depositado em um substrato de aço-carbono AISI 1020 por uma máquina de manufatura aditiva DED-LB da Universidade São Paulo (USP), campus São Carlos. Nas amostras produzidas foram utilizadas diferentes potências do laser e foram submetidas a ensaios de dureza Rockwell C. Os resultados revelaram que a dureza média das amostras tende a diminuir com o aumento da potência do laser, embora todos os valores se mantenham em um nível de dureza elevado. Foi observado que potências menores atingiram durezas superiores e as conclusões indicam que a tecnologia DED-LB é capaz de produzir componentes de aço M2 com alta dureza sem a necessidade de tratamento térmico adicional, mas com a possibilidade de um pós-processamento para obtenção de um material mais homogêneo.

PALAVRAS-CHAVE: dureza; manufatura aditiva; aço *AISI M2*; potência do laser; *DED-LB*.

INVESTIGATION OF IMPACTS ON THE HARDNESS OF AISI M2 STEEL PRODUCED BY DED-LB: The Effect of Laser Power

ABSTRACT: This study aimed to investigate the impacts on the hardness of AISI M2 high-speed steel produced by the Directed Energy Deposition – Laser Beam (DED-LB) additive manufacturing technique, with a focus on the influence of laser power. The choice of M2 steel is justified by its excellent hardness properties, but its fabrication by DED-LB presents challenges, making the optimization of this process crucial. The procedures adopted for this study consisted of analyzing the material supplied by the company Höganäs AB Inc, deposited on an AISI 1020 carbon steel substrate by a DED-LB additive manufacturing machine from the University of São Paulo (USP), São Carlos campus. Different laser powers were used on the produced samples, and they were subjected to Rockwell C hardness tests. The results revealed that the average hardness of the samples tends to decrease as the laser power increases, although all values remain at a high level of hardness. It was observed that lower powers achieved higher hardness. The conclusions indicate that DED-LB technology is capable of producing M2 steel components with high hardness without the need for additional heat treatment, but with the possibility of post-processing for a more homogeneous material.

KEYWORDS: hardness; additive manufacturing; *AISI M2* steel; laser power; *DED-LB*.

INTRODUÇÃO

Entre os processos mais avançados da manufatura aditiva (*Additive Manufacturing* – AM) está o *Directed Energy Deposition – Laser Beam* (DED-LB), que possibilita a deposição precisa de material metálico em substratos variados (Bressan *et al.*, 2005; Bressan *et al.*, 2009; Ko *et al.*, 2024). A crescente demanda por peças com alta performance em ambientes severos, como ferramentas de corte e moldes industriais, impulsionou o interesse na aplicação da tecnologia DED-LB em aços de alta liga, como o AISI M2 (Bressan *et al.*, 2005; Bressan *et al.*, 2009; Park *et al.*, 2021). Este aço rápido é amplamente reconhecido por sua elevada dureza, sendo, portanto, um candidato ideal para investigação deste estudo (Park *et al.*, 2021; Jiang *et al.*, 2024; Yang *et al.*, 2024).

No entanto, a aplicação do AISI M2 por DED-LB apresenta desafios técnicos significativos, que podem comprometer a integridade do revestimento (Ko *et al.*, 2024; Jiang *et al.*, 2024; Zakerin *et al.*, 2025). Sendo assim, este estudo desenvolve uma abordagem experimental, com a aplicação de diferentes potências de laser no processo de deposição (DED-LB) na produção de amostras do aço AISI M2, seguida da caracterização dos revestimentos resultantes por meio de ensaios de dureza. Ao compreender a relação entre os parâmetros de processamento e as propriedades finais do material, o trabalho visa contribuir para o aprimoramento da manufatura aditiva de aços, promovendo avanços em eficiência, sustentabilidade e desempenho funcional de componentes metálicos de alto valor agregado.

MATERIAL E MÉTODOS

O aço rápido AISI M2, material de estudo deste projeto, foi fornecido pela empresa Höganäs AB Inc. A deposição foi realizada sobre um substrato de aço carbono AISI 1020 com dimensões de aproximadamente 65 mm x 35 mm x 9 mm (Figuras 1 e 2), por uma máquina de manufatura aditiva *Directed Energy Deposition – Laser Beam* localizada dentro do departamento de Engenharia de Produção da Universidade São Paulo (USP), campus São Carlos. A área de deposição do material AISI M2, gerada pelo laser, possui aproximadamente as seguintes dimensões: 32 mm x 32 mm. Foram utilizadas as seguintes potências de deposição: 300 W, 350 W, 400 W, 450 W e 500 W.

FIGURA 1. Amostras de aço AISI M2 com potências de 300W, 350W, 400W, 450W.

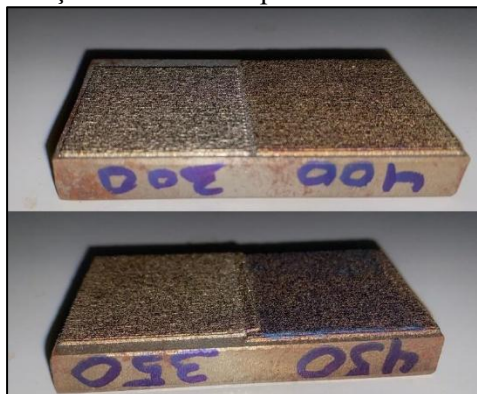
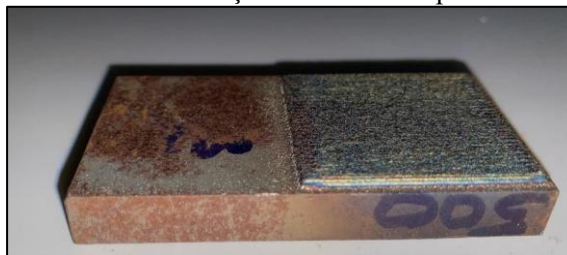


FIGURA 2. Amostra do aço AISI M2 com potência de 500W.



O ensaio de dureza Rockwell C (HRC) foi conduzido no laboratório do Instituto Federal de São Paulo (IFSP), campus Sertãozinho, com o apoio do professor responsável e de um bolsista, abrangendo a análise de cinco amostras de aço AISI M2.

Antes da realização do ensaio, as amostras foram previamente preparadas por meio do processo de lixamento (utilizando uma lixa com granulometria de 80), a fim de reduzir a rugosidade da superfície do material, conforme ilustrado na Figura 3.

FIGURA 3. Amostras após processo de lixamento.



As medições da dureza foram realizadas utilizando o durômetro Rockwell (Figura 4), na escala C (HRC), aplicando uma carga de 100 kgf, e os resultados obtidos para cada uma das potências de laser foram analisados.

FIGURA 4. Ensaio realizado utilizando a escala Rockwell C.



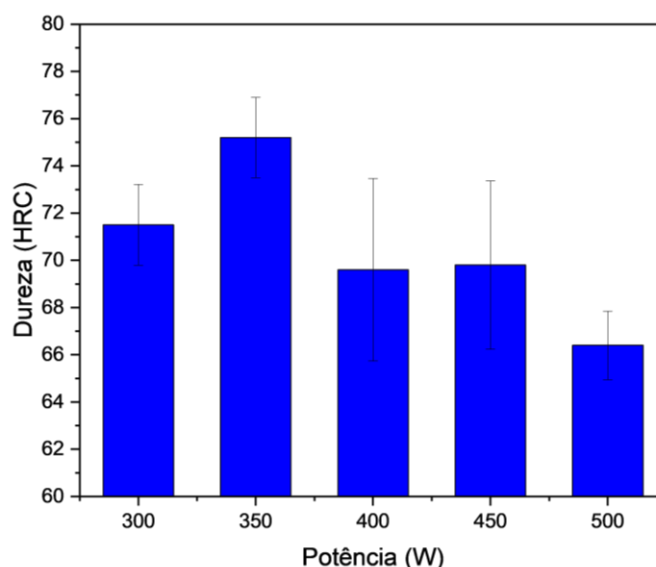
Para cada amostra, foram realizadas seis medições de dureza em regiões selecionadas aleatoriamente. As medidas discrepantes foram desconsideradas, e a média das quatro medições restantes foi adotada como valor representativo.

De forma geral, espera-se que o aumento da potência do laser pode promover alterações significativas nas características do material, em função da maior energia fornecida ao processo de deposição, potencialmente influenciando tanto a formação de fases mais duras quanto a modificação da estrutura cristalina.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 5 apresenta os resultados das durezas superficiais de todas as amostras. É possível identificar uma tendência de diminuição da dureza média à medida que a potência do laser aumenta. Embora os valores variem de uma amostra para outra, os dados mostram que a média da dureza diminui gradativamente conforme a potência do laser se eleva.

FIGURA 5. Dureza HRC Média vs. Potência de Laser.



Segundo Park *et al.* (2021) e Ko *et al.* (2024), o aço AISI M2 se destaca por sua elevada dureza, em torno de 66 HRC. No estudo de Ko *et al.* (2024), utilizando o processo *Extreme High-Speed DED* (EHLA3D), uma variante do *Directed Energy Deposition* a laser (DED-LB), com potência de 900 W, foi obtida dureza média de aproximadamente 67,5 HRC. Já Park *et al.* (2021), ao empregar o DED-LB também com potência de 900 W, registraram dureza próxima a 61 HRC, sem aplicação de tratamento térmico.

O aço AISI M2, após têmpera e revenimento, apresenta durezas típicas entre 59 e 65 HRC (Bressan *et al.*, 2009). Considerando também os resultados de Park *et al.* (2021) e Ko *et al.* (2024), que reportaram valores médios entre 61 e 67 HRC, observa-se que os valores obtidos neste estudo para a potência de 500 W estão em consonância com essa faixa. Contudo, para potências menores, verificaram-se valores médios superiores, variando entre 69 e 75 HRC.

De acordo com Baek *et al.* (2017):

“A microestrutura refinada indica que o material depositado sofre solidificação relativamente rápida durante a deposição, o que pode ser eficaz no aprimoramento das propriedades mecânicas resultantes do material depositado. Os grãos celulares menores e os carbonetos precipitados na amostra depositada em M2 levaram à dureza mais elevada.”

Callister (2020) também afirma que:

“Um material com granulação fina (um que possui grãos pequenos) tem dureza maior e é mais resistente que um material com granulação grosseira, uma vez que o primeiro possui maior área total de contornos de grão para impedir o movimento das discordâncias.”

Estudos recentes confirmam essa proposição, evidenciando que os carbonetos (como WC, MoC e VC) exercem efeito significativo na dureza e na resistência ao desgaste do aço AISI M2 produzido por DED. Esses carbonetos se formam em decorrência da segregação de elementos em solução sólida durante o rápido resfriamento associado à potência do laser (Bressan *et al.*, 2009; Park *et al.*, 2021; Jiang *et al.*, 2024; Yuan; Geng; Alfano, 2024). Dessa forma, é possível concluir que, possivelmente, maiores potências resultam em menores valores médios de dureza. Ainda assim, mesmo com essa redução, todas as amostras permanecem dentro da faixa da escala Rockwell C típica para ferramentas de corte, entre 60 e 70 HRC, conforme apresentado por Callister (2020).

Yuan, Geng e Alfano (2024) destacam que o aumento da potência do laser favorece a fusão do pó e eleva a microdureza do revestimento. Contudo, ressaltam que potências excessivas podem induzir o crescimento de grãos e, conseqüentemente, reduzir a microdureza. Assim, torna-se fundamental o controle adequado da potência do laser, a fim de evitar efeitos negativos nas propriedades mecânicas do material.

CONCLUSÕES

Este estudo teve como objetivo investigar o impacto da potência do laser na dureza do aço rápido AISI M2, depositado por meio da técnica DED-LB, com o intuito de otimizar o processo de manufatura aditiva. Os resultados demonstram de forma conclusiva que a dureza média do material tende a decrescer à medida que a potência do laser aumenta.

As Análises realizadas indicam que as amostras produzidas com potências menores alcançaram valores de dureza superiores, alinhados com a literatura que sugere que o processo de resfriamento rápido, característico de potências mais baixas, favorece a formação de uma microestrutura mais fina e a precipitação de carbonetos. Essa microestrutura refinada, conforme defendido por Baek et al. (2017) e Callister (2020), atua como uma barreira efetiva para o movimento de discordâncias, resultando em uma maior dureza do material.

Observou-se ainda que a variação de dureza entre as camadas, possivelmente decorrente do resfriamento rápido e não controlado característico do processo a laser, indicando que um pós-processamento ou tratamento térmico subsequente poderia ser necessário para uniformizar essa propriedade.

A principal contribuição deste trabalho é demonstrar que a manufatura aditiva DED-LB, com parâmetros otimizados, é capaz de produzir componentes de aço M2 com dureza equivalente ou até superior aos valores típicos do material após têmpera e revenimento (59-65 HRC), sem a necessidade de tratamento térmico posterior. Além disso, os resultados mostram que potências excessivas, como discutido por Yuan et al. (2024), podem levar à redução da dureza, evidenciando a criticidade do controle desse parâmetro.

Por fim, a variação de dureza observada entre as camadas aponta a necessidade de futuros estudos focados no pós-processamento ou tratamentos térmicos controlados, visando a obtenção de um material mais homogêneo e com propriedades mecânicas uniformes em toda a peça. A investigação detalhada da microestrutura em cada potência seria uma pesquisa complementar valiosa.

CONTRIBUIÇÕES DOS AUTORES

R.K.F.V. contribuiu com a curadoria e análise dos dados e ambos os autores, R.K.F.V. e M.A.F., atuaram na redação do trabalho.

Ambos os autores contribuíram com a revisão do trabalho e aprovaram a versão submetida.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a todos que de alguma forma direta ou indireta contribuíram para a realização deste estudo. Também agradeço ao professor e orientador Marcos Alves Fontes, pela orientação e apoio contínuo, que foram fundamentais para a realização deste trabalho. Agradeço ao professor Paulo Donato Frighetto, bem como à bolsista Raquel, pelo auxílio no ensaio de dureza Rockwell C e pelo suporte técnico. Por fim, expresso minha gratidão ao Instituto Federal de São Paulo, Campus Sertãozinho, que tornou este estudo possível.

REFERÊNCIAS

BAEK, G. Y., et al. Mechanical characteristics of a tool steel layer deposited by using direct energy deposition. **Metals and Materials International**, v. 23, p. 770-777, 2017.

BRESSAN, J. D., et al. Estudo da resistência à flexão e tenacidade dos aços AISI M2 e Villares VF800AT com diferentes revenimentos. **7º Encontro da Cadeia de Ferramentas, Moldes e Matrizes**, São Paulo/SP, 2009.

BRESSAN, J. D., et al. Estudo da resistência ao desgaste do aço Villares VF800AT com diferentes revenimentos. **6º Encontro da Cadeia Produtiva de Ferramentas, Moldes e Matrizes**, São Paulo/SP, 2005.

CALLISTER JR, W. D. **Callister's materials science and engineering**. John Wiley & Sons, 2020.

JIANG, L. et al. Forming Control and Wear Behavior of M2 High-Speed Steel Produced by Direct Energy Deposition on Curved Surface. **Materials**, v. 17, n. 24, p. 6119, 2024.

KO, M. et al. Extreme high-speed DED of AISI M2 steel for coating application and additive manufacturing. **Coatings**, v. 14, n. 8, p. 953, 2024.

PARK, Y. K. et al. Wear resistance of direct-energy-deposited AISI M2 tool steel with and without post-heat treatment. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v.116, n.7-8, p.3917–3931, 2021.

YANG, M. et al. Hardening of Selective Laser Melted M2 Steel. **Journal of Materials Engineering and Performance**, v.33, n.9, p.4278–4286, 2024.

YUAN, J.; GENG, H.; ALFANO, M. Multi-response optimization of M2 steel coatings deposited by co-axial laser cladding on A2 steel tool surfaces. **Journal of Materials Research and Technology**, v.29, p.1102–1117, 2024.

ZAKERIN, N. et al. Review of Tribological and Wear Behavior of Alloys Fabricated via Directed Energy Deposition Additive Manufacturing. **Journal of Manufacturing and Materials Processing**, v. 9, n. 6, p. 194, 2025.