

REFUSÃO A LASER PARA A MELHORIA DA INTEGRIDADE NA MANUFATURA ADITIVA POR DEPOSIÇÃO DIRETA DE ENERGIA

Congresso Brasileiro De Manufatura Aditiva, 1ª edição, de 30/11/2020 a 01/12/2020
ISBN dos Anais: 978-65-86861-62-4

PAES; Luiz Eduardo dos Santos¹, PEREIRA; Milton², XAVIER; Fábio Antônio³, RATUSZNEI; Francisco⁴, VILARINHO; Louriel Oliveira⁵

RESUMO

Resumo: antes de selecionar um componente sujeito a aplicações críticas, é importante assegurar sua integridade. Recentemente, a manufatura aditiva tem sido utilizada para a fabricação de peças em uma ampla gama de aplicações, que abrange desde o setor biomédico até o aeroespacial. No entanto, ainda existem desvantagens deste processo de fabricação relacionadas principalmente à qualidade da superfície e à presença de vazios. Embora métodos de pós-processamento estejam disponíveis, estes apresentam limitações. A proposta do presente trabalho é analisar a Refusão a Laser (RL) como uma alternativa de pós-processamento de componentes fabricados por Deposição Direta de Energia com Laser (DED-L). Imagens da superfície foram adquiridas com um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), antes e depois da refusão, e imagens transversais da camada foram feitas com um Microscópio Óptico (MO). Mediu-se também a rugosidade média (Ra) com um perfilômetro 2D. Os resultados indicaram que a RL contribuiu para a eliminação de partículas aderidas na superfície, fato que levou à redução de 53% em Ra, e simultaneamente induziu a redução da área de falta de fusão.

1. Introdução

A manufatura aditiva tem se mostrado cada vez mais presente em diferentes setores. Embora inicialmente direcionada à prototipagem, hoje é amplamente utilizada para a produção de componentes metálicos funcionais. Por exemplo, no campo médico, é possível construir próteses customizadas, com propriedades similares às dos ossos (Moiduddin et al, 2017). No setor aeroespacial, um componente de 20 peças se transformou em outro de uma única peça, feito camada por camada (Rockstroh, 2013). Uma série de benefícios podem ser citados como a possibilidade de construção de estruturas complexas, a redução da perda de material e um maior nível de produtividade (Gibson, 2010).

No entanto, ainda há limitações que dificultam a implementação em larga escala. Dentre elas destaca-se a integridade do componente. Após a fabricação, a peça deve preencher os requisitos de resistência mecânica, que são influenciados pela rugosidade da superfície e pelo nível de vazios (poros e falta de fusão).

Chan et al. (Chan et al., 2013) estudaram a influência da rugosidade da superfície na resistência à fadiga e concluíram que partículas não fundidas podem favorecer a concentração de tensões, o que contribui para a iniciação de uma trinca. Com relação ao nível de vazios, Yadollahi e Shamsaei (Yadollahi e Shamsaei, 2017) concluíram que vazios grandes e irregulares, próximos da superfície, são os principais fatores que limitam a resistência à fadiga.

Existe uma ampla gama de técnicas de pós-processamento disponíveis para lidar com os problemas abordados. O polimento manual constitui o método mais comum para a suavização de superfícies rugosas. Porém, não garante uniformidade e possui baixa produtividade (Gora et al., 2018). A Prensagem Isostática a Quente (PIQ) é usada para fechar poros internos, mas não é capaz de remover poros abertos, conectados à superfície (Atkinson e Davies, 2000).

A Refusão a Laser (RL) também é uma alternativa viável. O processo inicia após a formação de uma poça de fusão na superfície do metal, devido à radiação laser. Diferentemente dos processos

¹ Universidade Federal de Uberlândia, luiz.paes@ufu.br

² Universidade Federal de Santa Catarina, eng.milton@gmail.com

³ Universidade Federal de Santa Catarina, f.xavier@ufsc.br

⁴ Instituto Senai de Inovação em Laser, franciscoratusznei@gmail.com

⁵ Universidade Federal de Uberlândia, vilarinho@ufu.br

subtrativos, o material se redistribui devido à pressão capilar, que suaviza a superfície (Gora et al., 2018) e extingue os vazios simultaneamente (Demir e Previtali, 2017).

Poucos trabalhos investigaram a aplicação da RL como uma técnica de pós-processamento para a manufatura aditiva. Com o objetivo de preencher esta lacuna, o presente trabalho propõe o estudo da influência da RL nas características da superfície e nível de vazios após a deposição de uma camada de pó de ferro mediante o processo de Deposição Direta de Energia com Laser (DDE-L).

2. Metodologia

Os experimentos foram executados com uma fonte laser de fibra IPG Photonics, modelo YLS 10000, acoplada a um cabeçote óptico YW52 Precitec, e um bocal de alimentação projetado pelo Instituto de Tecnologia Laser Fraunhofer (ILT). Um alimentador de pó GTV e um sistema CNC Siemens SINUMERIK 840D SL com três módulos de movimentação também foram utilizados.

O foco do laser de 800 μm de diâmetro foi posicionado 15 mm acima da superfície. Argônio foi utilizado como gás de proteção. Pó de ferro foi selecionado como material de adição. Depositou-se uma camada sobre um substrato de aço A36 com 400 mm de comprimento, 20 mm de largura e 9,53 mm de espessura.

Para o processo de DDE-L, a potência $P = 450 \text{ W}$, velocidade de escaneamento $V = 600 \text{ mm/min}$, taxa de alimentação de 10 g/min e nível de sobreposição $OR=30\%$ foram aplicados como parâmetros de entrada. Durante a refusão, a potência também foi regulada em $P = 450 \text{ W}$ e a velocidade de escaneamento em $V = 600 \text{ mm/min}$.

A superfície foi avaliada com um perfilômetro Taylor Robson 2D em uma amostra com 5 mm de comprimento. O cut off utilizado foi de 0,8 mm. O raio do perfilômetro era de 2 μm , enquanto que a força aplicada, de 1,5 mN, e a velocidade, de 0,5 mm/s. A ponta do perfilômetro foi posicionada de forma perpendicular aos depósitos. O parâmetro de rugosidade média (R_a) foi selecionado para comparação.

O Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) HITACHI modelo TM3030 foi utilizado na análise da superfície antes e depois da refusão. Um Microscópio Óptico (MO) Olympus modelo BX60M também foi empregado para entender como a refusão afeta o nível de vazios nas seções transversais.

A eficiência de deposição dos cordões foi estimada com base na Equação 1, onde m_d corresponde à massa depositada, e m_t à massa total de pó utilizada.

$$\text{Eta} = m_d/m_t$$

Equação 1

A massa total é obtida mediante a multiplicação da velocidade de alimentação V_a pelo tempo t , de acordo com a Equação 2.

$$m_t = V_a * t$$

Equação 2

O tempo de deposição é calculado dividindo-se o comprimento total do cordão L pela velocidade de escaneamento V_s , conforme a Equação 3.

$$t = L / V_s$$

Equação 3

A massa depositada é calculada multiplicando-se a massa específica ρ pela seção transversal do cordão A e pelo comprimento L , como mostrado na Equação 4.

$$m_d = \rho * A * L$$

Equação 4

Cada cordão possui um comprimento de 20 mm. Por se tratar de pó de ferro, a densidade adotada foi de 7874 kg/m³.

3. Resultados

A Figura 1 apresenta as imagens capturadas com MEV da superfície da amostra processada por DDE-L com duas ampliações: (a) 100x e (b) 1000x. Há uma elevada quantidade de partículas de pó aderido na superfície, que não se fundiu com laser. Conforme indicado por Chan et al. (Chan et al., 2013), estas partículas atuam como concentradores de tensão e podem contribuir para a redução da resistência à fadiga.

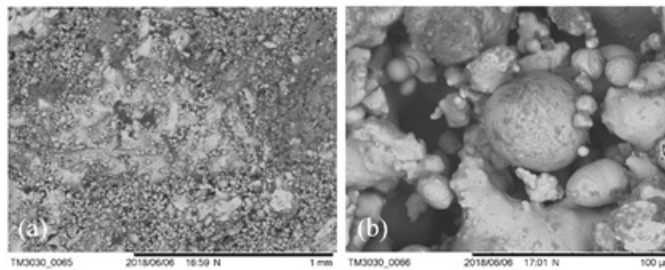


Figura 1. Análise mediante MEV da superfície da amostra processada por DDE-L. (a) Ampliação de 100x. (b) Ampliação de 1000x.

No entanto, quando a RL é aplicada, estas partículas de pó atingem o ponto de fusão e unem-se ao substrato. Desta forma, não são mais notadas, conforme indicado na análise mediante MEV mostrada na Figura 2, para os mesmos níveis de ampliação. As manchas pretas são óxidos que se formam durante o processamento.

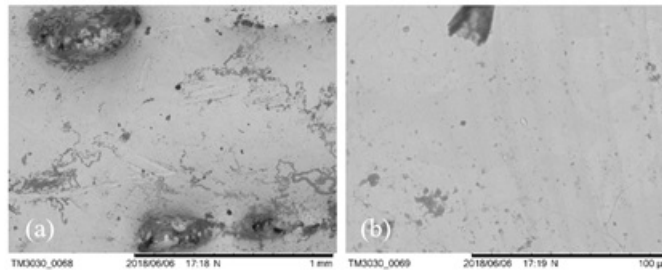


Figura 2. Análise mediante MEV da superfície processada por DDE-L e posteriormente refundida. (a) Ampliação de 100x. (b) Ampliação de 1000x.

Os perfis de rugosidade são apresentados na Figura 3. Após o processo de DDE-L, a superfície apresentou oscilações, que são evidenciadas pelos picos e vales (Figura 3a). O valor de Ra foi de 19,205 μm . Após a aplicação da RL, o Ra foi reduzido para 9,030 (Figura 3b).

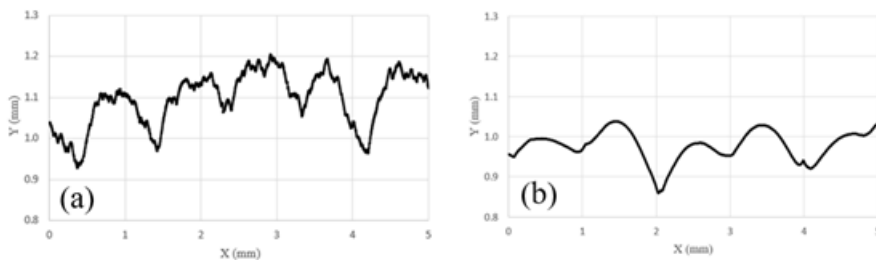


Figura 3. Perfil de rugosidade. (a) Após o processamento por DDE-L. (b) Após o processamento por DDE-L e refusão subsequente.

O nível de vazios foi estudado com base na seção transversal. A Figura 4 exhibe depósitos sobrepostos que formam a camada. Embora a taxa de deposição de pó tenha sido fixada, nota-se que a seção transversal de cada cordão variou, o que evidencia uma variação na eficiência de alimentação. Também é possível notar uma série de poros no interior dos cordões e falta de fusão entre os depósitos.

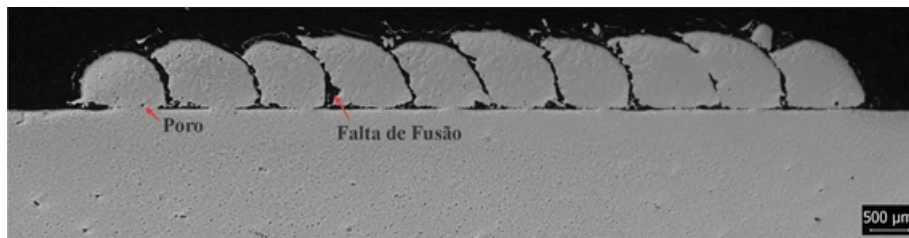


Figura 4. Camada resultante do processamento por DDE-L.

A eficiência de deposição foi calculada mediante as Equações 1 a 4. A Figura 5 exhibe como a eficiência varia em função da posição do cordão.

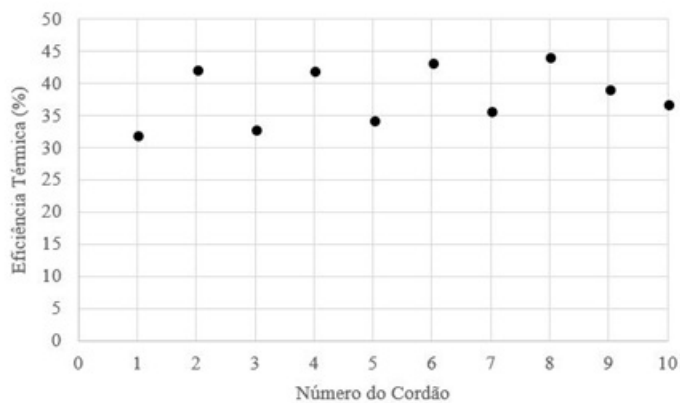


Figura 5. Eficiência de deposição para cada cordão.

A eficiência do primeiro cordão é a menor dentre todas. Isto ocorreu pois no primeiro cordão o pó escoou para as duas laterais. Além disso, o substrato encontrava-se frio. Nos demais cordões a perda de pó ocorreu em apenas uma das laterais e a deposição foi feita sobre o cordão anterior. Adicionalmente, a eficiência de deposição nos cordões de número par, com exceção do último cordão, é maior que a eficiência dos cordões de número ímpar. Uma explicação para este fenômeno é a diferença geométrica entre os cordões pares e ímpares. Os pares são menos convexos que os ímpares, o que alterou a condição inicial da deposição. A eficiência média de deposição foi de 38,4 % com desvio padrão de 4,3 %.

Quando a refusão foi aplicada sobre o depósito de DDE-L alguns poros permaneceram, porém houve uma redução da falta de fusão entre os depósitos. Em alguns pontos, a refusão foi capaz de unir os cordões, de acordo com a Figura 6. Logo, os vazios grandes e irregulares apontados por Yadollahi e Shamsaei (Yadollahi e Shamsaei, 2017) como o principal limitador da resistência à fadiga, puderam ser reduzidos.

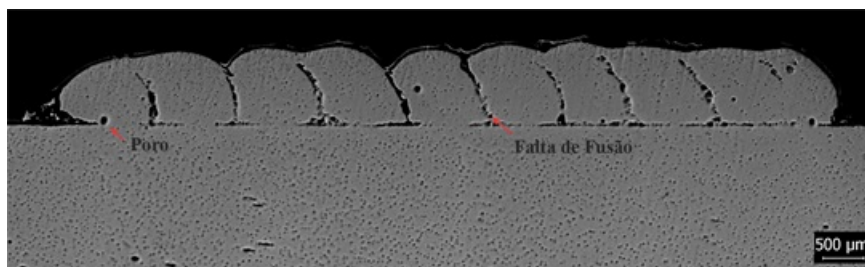


Figura 6. Camada resultante do processamento por DDE-L e refusão subsequente.

Com base nos resultados acima, é possível afirmar que o pós-processamento por RL é viável para a melhoria da integridade de componentes fabricados por manufatura aditiva, uma vez que suaviza a superfície (redução de 53% em Ra) e reduz a incidência de vazios irregulares causados pela falta de fusão. Trabalhos futuros serão dedicados à avaliação dos efeitos da refusão entre camadas com o intuito de minimizar aspectos indesejáveis e poder aplicar esta tecnologia em larga escala.

4. Conclusão

O presente trabalho apresenta as seguintes conclusões:

- 1 - A RL contribuiu para a suavização da superfície após o processo de DDE-L, conforme indicado pelo perfil de rugosidade. Houve uma redução da rugosidade Ra de 53%. Após a refusão, as partículas não fundidas não foram detectadas na análise em MEV.
- 2 - A área de falta de fusão foi reduzida entre os depósitos após a RL, o que contribuiu para o aumento da resistência à fadiga.
- 3 - Diferentemente dos métodos convencionais de pós-processamento, a RL é capaz de lidar simultaneamente com a melhoria da superfície e a redução do nível de vazios.

5. Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer o suporte financeiro da empresa Petróleo Brasileiro S.A. (Petrobras) e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). Também

estende o agradecimento ao Laboratório de Mecânica de Precisão, Divisão de Laser (LMP-LASER) e ao Centro para Pesquisa e Desenvolvimento de Processos de Soldagem (LAPROSOLDA) pelo apoio técnico.

6. Referências

Atkinson, H.V. and Davies, S., 2000. "Fundamental aspects of hot isostatic pressing: and overview". *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol 31A, pp. 2981-3000.

Chan, K. S. et al., 2013. "Fatigue life of titanium alloys fabricated by additive-layer manufacturing techniques". *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol 44, pp. 1010-1022.

Demir, A. G. and Previtali, B., 2017. "Investigation of remelting and preheating in SLM of 18Ni300 maranging steel as corrective and preventive measures for porosity reduction". *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol 93, pp. 2697-2709.

Gibson, I., 2010. *Additive Manufacturing Technologies*. Springer, New York.

Gora, W.S. et al., 2018. "Laser polishing of additively manufacture COCR and Ti6Al4V parts and subsequent stress relieving". In *Proceedings of the 37th International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics - ICALEO 2018*. Orlando, United States.

Moiduddin, K. et al, 2017. "Structural and mechanical characterization of custom cranial implant created using additive manufacturing". *Electronic Journal of Biotechnology*, Vol 29, pp. 22-31.

Rockstroh, T. et al., 2013. "Additive manufacturing at GE aviation". *Industrial Laser Solutions*, pp. 4-6.

Yadollahi, A. and Shamsaei N., 2017. "Additive manufacturing of fatigue resistant materials: challenges and opportunities". *International Journal of Fatigue*, Vol 98, pp. 14-31.

PALAVRAS-CHAVE: impressão 3D, Deposição Direta de Energia, rugosidade, porosidade, falta de fusão.