

Copyright 2022, ABINOX, ABRACO, IPT

Trabalho apresentado durante o INOXCORR 2022 - Seminário Brasileiro de Aços Inoxidáveis como Solução Contra Corrosão, realizado presencialmente no dia 23 de novembro de 2022.

As informações e opiniões contidas neste trabalho são de exclusiva responsabilidade do(s) autor(es).

Aplicando a otimização de parâmetros para Fusão em Leito de Pó a Laser (L-PBF) ao processamento do aço inoxidável austenítico 316L

Gustavo Figueira¹, Riccardo Augusto Moreira Montuori², Guilherme Yuuki Koga³, Piter Gargarella⁴

Resumo

Dada a eminência dos processos de manufatura aditiva e impressão 3D, é vital que novas tecnologias sejam desenvolvidas e aprovadas no âmbito nacional. A determinação de condições de operação que resultem em peças com elevado desempenho é uma etapa fundamental nesse desenvolvimento, e deve ser adequada a cada combinação de material e equipamento. Considerando a excelente processabilidade do aço inoxidável 316L e o seu desempenho igual ou superior ao ser produzido por Fusão em Leito de Pó a Laser (L-PBF), o presente trabalho visa realizar a otimização dos parâmetros de processamento para esse aço em um equipamento nacional, a OmniSint 160. A análise de 40 condições de processamento distintas permitiu identificar conjuntos de parâmetros de processo que resultaram em elevada densificação. A identificação de tais parâmetros foi feita pela construção da curva de densidade em função da densidade volumétrica de energia, que equivale ao aporte térmico aplicado ao processo. A amostra produzida a 192 W, 1000 mm/s e 70 μm atingiu a densidade máxima de $8,04 \pm 0,08 \text{ g/cm}^3$, exibindo porosidade abaixo de 0,1 %v.

Palavras-chave: Manufatura aditiva, aço inoxidável austenítico, fusão em leito de pó, processamento a laser, porosidade.

Introdução

Os processos de manufatura aditiva têm conquistado a atenção da indústria e da comunidade científica devido à sua grande versatilidade, permitindo a fabricação de componentes outrora impossíveis de serem obtidos por rotas convencionais. Tal versatilidade, associada com o elevado grau de customização de cada componente fabricado, justificam o uso de processos de manufatura aditiva nos mais variados setores, desde componentes biomédicos até dispositivos para sondas espaciais (1). Em relação aos materiais metálicos, os processos que correspondem à maior fatia do mercado são a Deposição com Energia Direta (DED) e, em especial, a Fusão em Leito de Pó (PBF) (2). Este último processo possui variações conforme a fonte de energia empregada, seja por feixe de elétrons (EB-PBF) ou por laser (L-PBF).

A Fusão em Leito de Pó a Laser (L-PBF) é um processo de manufatura aditiva que consiste na fusão seletiva de um leito de pó, consolidando a peça ao formar e fundir o leito de pó sucessivamente. A fusão ocorre em atmosfera inerte, seja de argônio ou nitrogênio. Apesar do conceito relativamente simples, alguns autores defendem que há mais de 130 parâmetros que

¹ Doutorando, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais (PPGCEM) - UFSCar

² Graduando, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais (PPGCEM) - UFSCar

³ Professor Doutor, Departamento de Engenharia de Materiais (DEMa) - UFSCar

⁴ Professor Doutor, Departamento de Engenharia de Materiais (DEMa) - UFSCar

podem influenciar na qualidade da peça formada (3). A título de exemplo, podemos citar o trabalho reportado por ANDREAU et al. (2019), no qual os autores modificaram as propriedades das peças impressas apenas alterando a posição de entrada de argônio na câmara de impressão. Portanto, é primordial otimizar os parâmetros de processo para estabelecer uma janela de processamento adequada para a fabricação de componentes com baixo nível de porosidade e defeitos e elevado desempenho (5). Conforme a Figura 1, os parâmetros ligados ao equipamento e à matéria-prima, utilizada na forma de pó, não são passíveis de controle, enquanto que parâmetros de processo como potência e velocidade do laser e distância entre pistas podem ser modificados a fim de aumentar a qualidade das peças produzidas. Um das características que mais influenciam no desempenho das peças impressas é a porosidade que, apesar de se originar por uma série de fatores distintos (falta de fusão, aprisionamento de gás, etc), pode ser controlada e minimizada até valores abaixo de 1 %v (6).

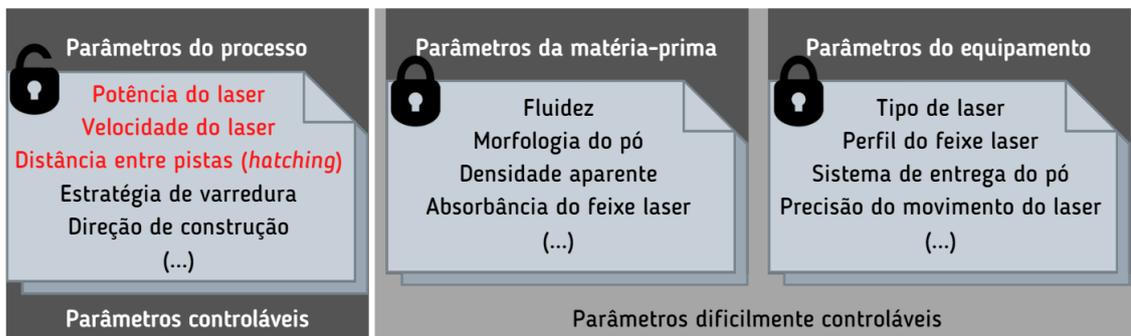


Figura 1 – Diferentes tipos de parâmetros presentes no processo de L-PBF.

Com sua notória elevada resistência à corrosão e aliado à grande versatilidade proporcionada pelos processos de manufatura aditiva, o aço 316L se revela como um dos materiais mais promissores para a produção de componentes por impressão 3D nos mais variados ramos da indústria (7). A excelente processabilidade do aço inoxidável austenítico 316L por Fusão em Leito de Pó a Laser (L-PBF) permite a obtenção de peças com elevada densidade, minimizando a presença de defeitos como trincas e empenamentos. A literatura científica também indica que o processamento por L-PBF pode aumentar a resistência à corrosão do aço 316L pelo aumento do potencial de pite em água do mar (8), fluido biológico simulado – SBF (9) e solução-tampão de fosfato – PBS (10). Além disso, vários autores reportam que o aço 316L fabricado por L-PBF possui desempenho similar ao processado por forjamento em termos de corrosão sob tensão em condições para aplicações em reatores nucleares (11) e de biocompatibilidade para aplicações em biomateriais (9).

Nesse sentido, é essencial desenvolver tecnologias nacionais para o processamento do aço inoxidável 316L por rotas de manufatura aditiva. O objetivo do presente trabalho é apresentar um método simplificado para otimização de parâmetros de processo para a fabricação do aço inoxidável 316L por L-PBF.

Metodologia

O processamento por L-PBF foi fabricado na máquina OmniSint-160, desenvolvida com tecnologia nacional pela OmniTek (São Paulo/SP). No total, foram fabricadas 40 amostras em duplicata com diferentes condições de potência, velocidade e distância entre pistas. As amostras

possuíam 3 mm de diâmetro e 10 mm de altura. As condições gerais de processamento aplicadas no presente trabalho são apresentadas na Tabela 1. Foi utilizado pó comercial de aço inoxidável 316L produzido por atomização a gás e fornecido pela LPW Technology.

Tabela 1 – Parâmetros empregados na produção das amostras por L-PBF.

| Laser | Potência do laser W | Velocidade do laser mm/s | Distância entre pistas µm | Espessura de camada µm | Rotação entre camadas | Estratégia de varredura | Atmosfera |
|-------------|------------------------|-----------------------------|------------------------------|---------------------------|-----------------------|-------------------------|-----------|
| Fibra de Yb | 73 – 192 | 900 – 1300 | 70 – 80 | 30 | 79° | Unidirecional | Argônio |

As medidas de densidade foram realizadas em triplicata com uma balança hidrostática Gehaka DSL910 e uma solução de 0,2 %v de glicerina, baseando-se no princípio de Arquimedes. As amostras selecionadas foram preparadas metalograficamente por lixamento e polimento em alumina, seguido de ataque químico com solução Villela. A análise microestrutural foi realizada por meio de microscopia ótica com o auxílio de um microscópio Olympus BX41M-LED.

Resultados e discussão

A Figura 2 apresenta os dados de densidade para as amostras fabricadas por L-PBF. É possível notar que foram encontradas densidades elevadas para várias condições de processamento, atingindo valores próximos ao máximo teórico de 8,0 g/cm³ (12). As curvas para distância entre pistas de 70 e 80 µm apresentam tendências similares, com a máxima densificação sendo atingida em valores de potência do laser mais elevados.

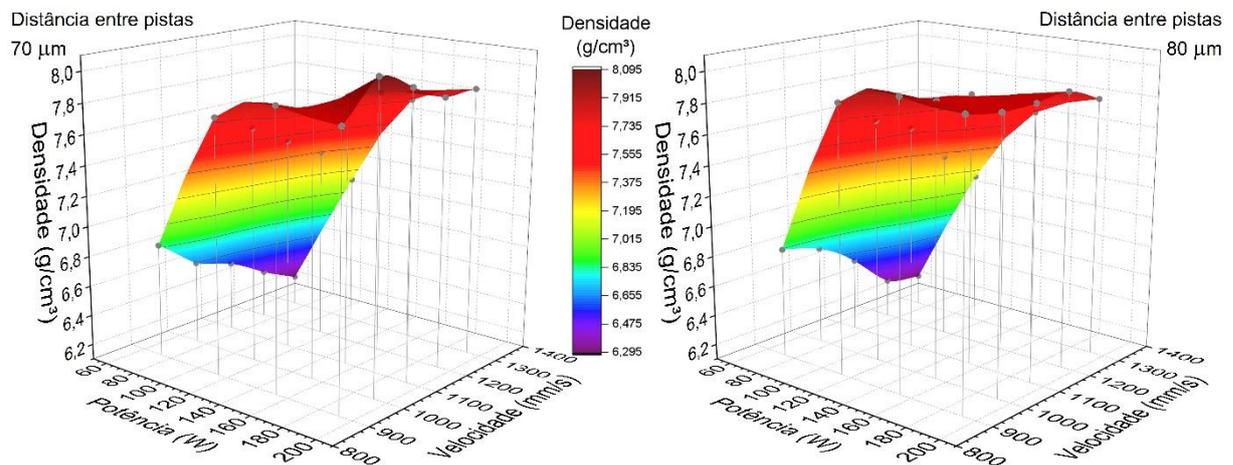
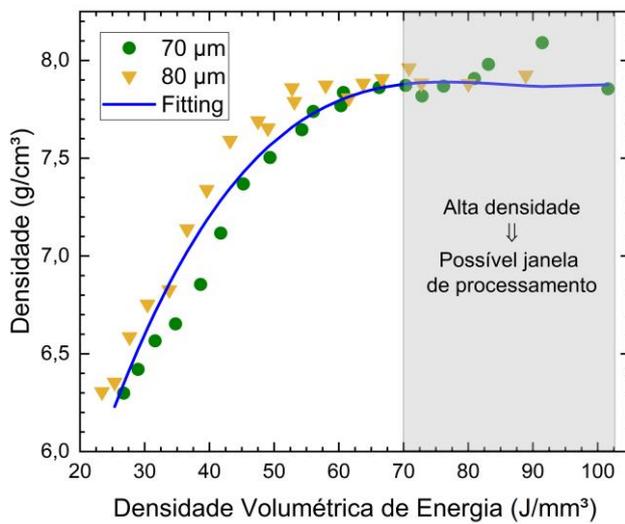


Figura 2 – Densidade em função dos parâmetros de processamento por L-PBF.

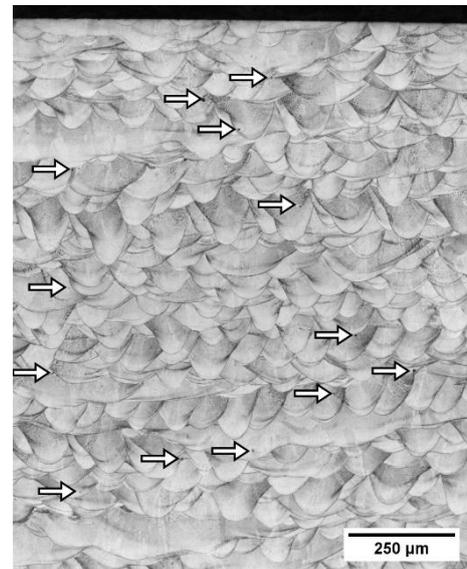
É possível então correlacionar a potência e a velocidade do laser em um único parâmetro, a densidade volumétrica de energia (*DVE*), convertendo os dados através da Eq. 1:

$$DVE = \frac{P}{v \times h \times e} \quad \text{Eq. 1}$$

onde P é a potência do laser, v a velocidade do laser, h a distância entre pistas e e a espessura de camada. Dessa forma, é possível visualizar os dados de densidade através da curva de densidade em função da DVE , como indicado na Figura 3.a. É possível notar a ocorrência de um patamar no qual a densidade se mantém elevada para diferentes níveis de DVE . Os parâmetros de processo que correspondem a tais densidades formam uma janela de processamento possível para o aço inoxidável 316L. A fim de corroborar os resultados obtidos pelo princípio de Arquimedes, a porosidade foi avaliada através da análise metalográfica das amostras. A Figura 3.b revela a microestrutura da amostra com maior densidade ($8,04 \pm 0,08 \text{ g/cm}^3$), obtida com os parâmetros de 192 W, 1000 mm/s e 70 μm ($DVE = 91,4 \text{ J/mm}^3$). É possível então comprovar a presença de eventuais poros, que correspondem a um total de apenas 0,01 %v da amostra.



(a)



(b)

Figura 3 – Densificação do aço 316L por L-PBF. (a) Densidade em função da Densidade Volumétrica de Energia (DVE), indicando uma possível janela de processamento. (b) Microestrutura da amostra com maior densificação. As setas indicam eventuais poros.

A otimização de parâmetros com base na DVE é um método simples para estabelecer condições experimentais que resultem em elevadas densidades, definindo assim uma janela de processamento. Apesar de suficiente para a maior parte das aplicações tecnológicas, este método pode ser ainda mais aprimorado ao incorporar ferramentas estatísticas de design de experimentos na janela de processamento encontrada, permitindo avaliar nuances no comportamento da liga e encontrar qual o ponto ótimo de operação (5).

Conclusões

O controle da densidade medida pelo princípio de Arquimedes permite a otimização de parâmetros de Fusão em Leito de Pó a Laser (L-PBF). Os parâmetros de processo (potência e velocidade do laser, distância entre pistas e espessura de camada) podem ser correlacionados em um único parâmetro, a Densidade Volumétrica de Energia (DVE). Ao plotar os dados de densidade em função da DVE , é possível encontrar um patamar no qual a densidade é constante,

próxima da densidade máxima, o que corresponde a uma janela de processamento possível para o material estudado. No caso do aço inoxidável 316L, a condição de 192 W, 1000 mm/s e 70 µm resultou no maior valor de densidade obtido, equivalente a $8,04 \pm 0,08 \text{ g/cm}^3$. A análise por microscopia ótica indicou a baixa porosidade presente na amostra, em torno de 0,01 %v.

Referências bibliográficas

- (1) DEBROY, T. et al. Additive manufacturing of metallic components - Process, structure and properties. **Progress in Materials Science**, 92, 112–224, 2018. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.10.001>>.
- (2) DUTTA, B.; BABU, S.; JARED, B. Markets, applications, and costs. In: DUTTA, B.; BABU, S.; JARED, B. (Org.). **Science, Technology and Applications of Metals in Additive Manufacturing**. Elsevier, 2019. p. 309–332. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-816634-5.00009-1>>.
- (3) YADROITSEV, I. **Selective laser melting: Direct manufacturing of 3D-objects by selective laser melting of metal powders**. Lambert Academic Publishing, 2009.
- (4) ANDREAU, O. et al. Texture control of 316L parts by modulation of the melt pool morphology in selective laser melting. **Journal of Materials Processing Technology**, 264, 21–31, 2019. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.08.049>>.
- (5) MIRANDA, G. et al. Predictive models for physical and mechanical properties of 316L stainless steel produced by selective laser melting. **Materials Science and Engineering A**, 657, 43–56, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2016.01.028>>.
- (6) SUN, Z. et al. Selective laser melting of stainless steel 316L with low porosity and high build rates. **Materials and Design**, 104, 197–204, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2016.05.035>>.
- (7) MUKHERJEE, T.; DEBROY, T. Printability of 316 stainless steel. **Science and Technology of Welding and Joining**, 24, 5, 412–419, 2019. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1080/13621718.2019.1607061>>.
- (8) SANDER, G. et al. On The Corrosion and Metastable Pitting Characteristics of 316L Stainless Steel Produced by Selective Laser Melting. **Journal of The Electrochemical Society**, 164, 6, C250–C257, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1149/2.0551706jes>>.
- (9) KONG, D. et al. Bio-functional and anti-corrosive 3D printing 316L stainless steel fabricated by selective laser melting. **Materials and Design**, 152, 88–101, 2018. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2018.04.058>>.
- (10) YUE, X. et al. Revealing the superior corrosion protection of the passive film on selective laser melted 316L SS in a phosphate-buffered saline solution. **Applied Surface Science**, 529, 147170, 2020. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.147170>>.
- (11) LOU, X. et al. On the stress corrosion crack growth behaviour in high temperature water of 316L stainless steel made by laser powder bed fusion additive manufacturing. **Corrosion Science**, 128, 140–153, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.corsci.2017.09.017>>.
- (12) GONG, H. et al. Comparison of Stainless Steel 316L Parts Made by FDM- and SLM-Based Additive Manufacturing Processes. **JOM**, Department of Manufacturing Engineering, Georgia Southern University, Statesboro; GA; 30460, United States, 71, 3, 880–885, 2019. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s11837-018-3207-3>>.