

# ESTUDO DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS NA FABRICAÇÃO POR L-PBF DO FE-WT3,5%SI <sup>1</sup>

Luane Maria de Brito Prata (N. R.)<sup>2</sup>

## RESUMO

A manufatura aditiva é um método de fabricação em crescente ascensão nos processos industriais. O processo de fabricação por fusão a laser de um leito de pó (L-PBF) é um método de manufatura aditiva que permite trabalhar com a construção de geometrias complexas e de propriedades mecânicas equivalentes aos processos de fabricação convencionais. Entretanto, a qualidade do componente feito por L-PBF é dependente dos parâmetros de fabricação utilizados para o material que é fabricado. Em materiais ferromagnéticos macios, como o ferro-silício, a fabricação por L-PBF possibilita obter uma rota de processamento que obtenha textura metalográfica que atenda aos requisitos magnéticos. Porém a presença de defeitos nos componentes de FeSi é prejudicial às suas propriedades magnéticas. Neste trabalho será estudado como os parâmetros de velocidade de varredura, potência do laser e distância entre filetes influenciam sobre as propriedades do Fe-Si com 3,5% de massa de silício fabricado por L-PBF. Para avaliação será realizado ensaios de rugosidade, densidade aparente e por imagem para encontrar um parâmetro de fabricação que seja denso e com baixa rugosidade. A camada de 60  $\mu\text{m}$  foi proposta para abranger uma janela de processamento que tenha valores de maior produtividade, uma vez que essa permite reduzir o tempo de varredura utilizando o dobro da espessura padrão de 30  $\mu\text{m}$ . Para a fabricação foram selecionados os valores de potência de 200, 300 e 400 W, valores de velocidade de escaneamento de 400, 600, 800 e 1000 mm/s e valores de distância entre filetes de 80, 100 e 120  $\mu\text{m}$  para cada espessura de camada. Dessa forma, foi possível obter amostras com densidade superiores a 99,5% e identificar fenômenos que podem ocasionar defeitos nas amostras.

**Palavras-chave:** L-PBF; FeSi; Densidade; Janela de processamento.

## ABSTRACT

Additive manufacturing is a growing manufacturing method in industrial processes. The laser powder bed fusion manufacturing process (L-PBF) is an additive manufacturing method that allows working with the construction of complex geometries and mechanical properties equivalent to conventional manufacturing processes. However, the quality of the component made by L-PBF is dependent on the manufacturing parameters used for the material that is manufactured. In softmagnetic materials, such as ferrosilicon, manufacturing by L-PBF makes it possible to achieve a processing route that obtains a good metallographic texture. However, the presence of defects in FeSi components is detrimental to their magnetic properties. The objective of this article is to develop parameters for manufacturing FeSi with fewer manufacturing defects for layer thicknesses of 30  $\mu\text{m}$  and 60  $\mu\text{m}$ . The 60  $\mu\text{m}$  layer was proposed to cover a processing window that has higher productivity values, as it allows scanning time to be reduced using twice the standard thickness of 30  $\mu\text{m}$ . For manufacturing, power values of 200, 300 and 400 W, scanning speed values of 400, 600, 800 and 1000 mm/s and values of distance between filaments of 80, 100 and 120  $\mu\text{m}$  for each layer thickness were selected. In this way, it was possible to obtain samples with density superior to 99.5% and identify phenomena that can cause defects in the samples.

---

<sup>1</sup> Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para obtenção do grau de bacharel no Curso de Ciência e Tecnologia, do Centro Tecnológico de Joinville (CTJ), da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), sob orientação do Dr. Dalton Luiz Rech Vidor.

<sup>2</sup> Graduando como Bacharel em Ciência e Tecnologia E-mail: luanep prata@gmail.com

mm/s and hatching distance of 80, 100 and 120  $\mu\text{m}$  for each layer thickness. In this way, it was possible to obtain samples with a density greater than 99,5% and identify phenomena that could cause defects in the samples.

**Keywords:** L-PBF; FeSi; Density; Processing window.

## 1. INTRODUÇÃO

A norma ISO/ASTM 52900:2015 define manufatura aditiva como o processo de união de materiais para fabricar peças, a partir de modelos virtuais, camada sobre camada em oposição aos métodos de manufatura subtrativa e de conformação. A partir desse método existem diferentes tipos e formas de materiais que podem ser fabricados.

A matéria prima consiste em metais, polímeros, cerâmicas e compósitos, que a partir do método empregado apresentam-se na forma de pó, filamento, fita, lâmina ou líquido. A manufatura aditiva consiste, então, na união da matéria prima, camada por camada, com espessura de camada variadas e dependente da tecnologia adotada. (Gibson, 2015) Neste trabalho será utilizada a técnica de fusão em leito de pó a laser ( *Laser Powder bed fusion*, L-PBF)

A tecnologia de L-PBF possibilita a construção de geometrias complexas e de propriedades mecânicas equivalentes aos processos de fabricação tradicionais. Permite também o desenvolvimento de topologias que não são executáveis por outras técnicas de fabricação. (Yadroitsev e Smurov, 2010)

Na tecnologia de L-PBF, a matéria prima, que é dada na forma de pó metálico, é fundida por um feixe de laser que varre a superfície do leito de pó depositado, solidificando uma camada com a espessura determinada, na escala de micrometros. Após a fusão dessa camada, a cuba onde está o pó desce o equivalente a espessura da camada e um dispositivo de distribuição varre homogeneamente o pó nesse leito. O processo repete camada a camada até a finalização do componente. (Munhoz et al., 2017)

A qualidade do componente feito por L-PBF é dependente dos parâmetros de fabricação. Os principais parâmetros da fabricação são a velocidade de varredura, potência do laser, espessura da camada e distância entre filetes e a partir destes é calculada a densidade de energia volumétrica. De acordo com Gu et al (2012), a combinação desses parâmetros melhora o controle do processo, a densidade volumétrica de energia (DVE) é uma relação que permite a avaliação da quantidade e do tamanho dos poros e tem influência sobre a consolidação da matéria prima.

Os principais defeitos que podem ocorrer durante a fabricação são a falta de fusão e porosidade por aprisionamento de gás. Ng et al (2009) fala que a falta de fusão é influenciada principalmente pelo baixo valor de DVE, esse defeito ocorre quando a energia é insuficiente para fundir totalmente o material em pó. A porosidade por aprisionamento de gás está relacionada ao fluxo do gás, geometria da peça de fusão e qualidade do pó.

Outros defeitos como trincas também podem ser observados. Seus motivos de ocorrências são diversos, como falta de potência durante a fabricação e composição do material fabricado. Nas ligas de ferro-silício, por exemplo, Feliciano

(2023) identificou que uma maior quantidade de silício pode proporcionar o surgimento maior de trincas durante a fabricação.

As ligas de ferro-silício são caracterizadas como materiais magnéticos macios e podem ter diversos percentuais de silício de acordo com a aplicação. Rodriguez-Vargas et al (2023) caracteriza materiais magnéticos macios por serem magnetizados com baixa excitação, atingem altos valores de indução magnética, possuem alta permeabilidade magnética e produzem menores perdas de energia por ciclo de magnetização. O silício é um elemento que tem a capacidade de aumentar a resistividade da liga e por causa de suas propriedades as ligas de ferro-silício são um material utilizado em máquinas elétricas, onde é responsável por transportar e amplificar a densidade do fluxo magnético. (Giannotta et al., 2023)

Diversos trabalhos buscam entender as relações entre as condições de processo, desenvolvimento da microestrutura, composição da liga, tratamento térmico, rugosidade de componentes e as propriedades magnéticas. Garibaldi et al (2018) realizaram a fabricação por L-PBF de Fe-6,9%Si variando a velocidade de varredura e a potência do laser. Realizaram caracterizações da matéria-prima, estudo de tratamento térmico para alívio da tensão residual e análise das propriedades magnéticas das amostras. Concluiu-se que a porosidade do material e sua textura cristalográfica são os principais fatores que influenciam nas propriedades magnéticas do material.

Goodall et al (2024) realizaram a fabricação de amostras de Fe-Si com paredes finas e diferentes angulações para estudo da rugosidade, microestrutura e propriedades magnéticas. Concluiu-se que o desempenho magnético das amostras foi diminuindo com o aumento da rugosidade das amostras, e que parâmetros de construção aprimorados e o polimento ocasionaram melhorias nas propriedades magnéticas.

Lyrio et al (2024) fabricaram amostras de paredes finas de Fe-Si por L-PBF com estratégias de varreduras diferentes e aplicou um processamento termomecânico para avaliação da microestrutura e propriedades magnéticas. Observou que a estratégia de varredura influencia na textura das amostras e na intensidade do crescimento do grão após o recozimento.

Neste trabalho será estudado como os parâmetros de espessura de camada, velocidade de varredura, potência do laser e distância entre filetes influenciam sobre as propriedades do Fe-Si com 3,5% de massa de silício fabricado por L-PBF. Para avaliação será realizado ensaios de rugosidade, densidade aparente pelo método de Arquimedes e por imagem para encontrar um parâmetro de fabricação que seja denso e com baixa rugosidade.

## 2. METODOLOGIA

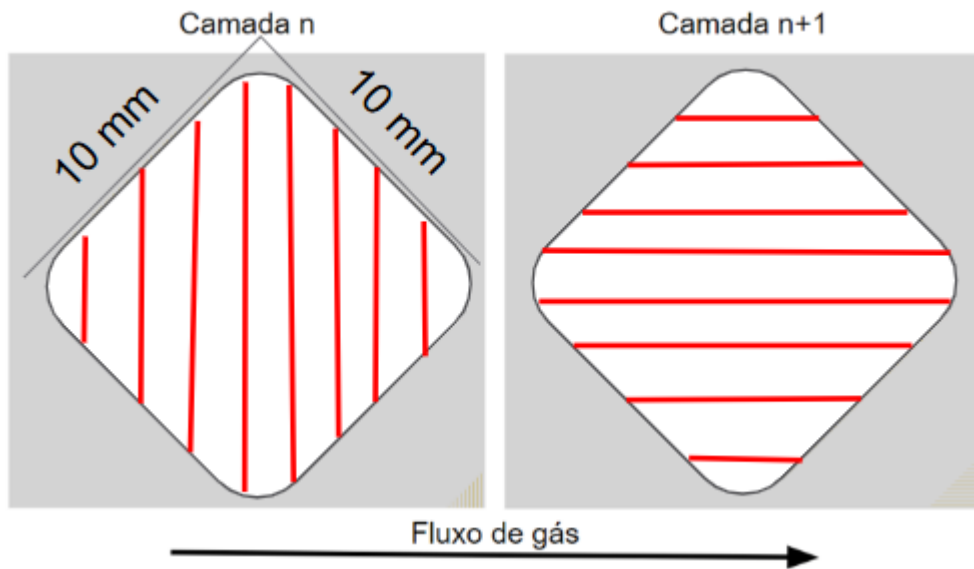
As amostras foram fabricadas com pó metálico de Fe-Si com 3,5% de massa de silício da M4P material solution de granulometria com mínimo de 13  $\mu\text{m}$  e máximo de 53  $\mu\text{m}$ , densidade aparente de 4,25  $\text{g/cm}^3$  e escoabilidade de 3 s/50 g.

A máquina utilizada foi a SLM 125HL da SLM Solutions de dimensões de 125x125x125 mm com atmosfera inerte controlada de argônio e com placa aquecida de temperatura máxima de 200°C. A fonte laser utilizada foi a IPG Photonics YLR-

400-SM de potência máxima de 400W, com onda laser do tipo contínuo, comprimento de onda na faixa infravermelha e diâmetro focal de 70  $\mu\text{m}$  a 100  $\mu\text{m}$ . O planejamento e posicionamento das amostras na plataforma foram realizados no software da materialise Magics.

A estratégia de varredura utilizada para este estudo foi posicionar a amostra a 45° em relação ao fluxo de gás e com mudança de 90° a cada camada, como mostrado na figura 1.

Figura 1– Estratégia de varredura do laser



Fonte: Autor

Os parâmetros estudados neste trabalho são a espessura de camada, potência do laser, velocidade de varredura e a distância entre filetes. A espessura de camada é um parâmetro que indica a altura da camada de pó que é depositada para fabricar as camadas do componente, sendo um dos principais influenciadores no tempo de fabricação. A potência do laser é um indicador da energia do feixe de laser que incide no material. A velocidade de varredura é dada em mm/s e representa a velocidade que o laser percorre o leito de pó. A distância entre filetes é um parâmetro que indica a distância de sobreposição entre as linhas que o laser percorre para fabricação da camada. Amostras de 10x10x15 mm foram fabricadas para análise dos parâmetros do quadro 1.

Quadro 1 - Parâmetros selecionados

|                                       |                     |
|---------------------------------------|---------------------|
| Espessura de camada ( $\mu\text{m}$ ) | 30; 60              |
| Potência do laser (W)                 | 200; 300; 400       |
| Velocidade de varredura (mm/s)        | 400; 600; 800; 1000 |

|                              |                  |
|------------------------------|------------------|
| Distância entre filetes (mm) | 0,08; 0,10; 0,12 |
|------------------------------|------------------|

A espessura de camada de 30  $\mu\text{m}$  foi selecionada e a partir dele foi proposto uma avaliação de produtividade com a espessura de 60  $\mu\text{m}$ , pois esta permite uma redução do tempo de fabricação. A potência, a velocidade de varredura e a distância entre filetes foram selecionados para garantir um componente sólido a partir da densidade volumétrica de energia (DVE). A combinação dos parâmetros envolvidos é dada em  $\text{J}/\text{mm}^3$  e sua expressão é dada pela equação 1. As variáveis da equação são a potência do laser (P), a distância entre filetes (d), a velocidade de varredura (v) e a espessura de camada (e).

Equação 1

$$DVE = \frac{P}{dve}$$

A DVE, de acordo com Yap et al (2016), é um modelo utilizado seguindo a lógica de processamento de uma linha para uma camada e depois para um bloco. Ng et al (2009) mostra que DVEs muito alto ou baixos ocasionam maiores defeitos de fabricação. O trabalho de King et al (2014) mostra que a DVE quando muito elevada gera o efeito keyhole na amostra fabricada. Scipioni et al (2017) mostrou que esse efeito ocorre em materiais ferrosos, como o 316L, acima de 150  $\text{J}/\text{mm}^3$  independentemente da espessura da camada fabricada. Para este estudo, portanto foram desconsiderados experimentos com a velocidade de varredura de 400  $\text{mm}/\text{s}$  para a camada de 30 micrometros que gerava cálculos de DVE muito elevados (acima de 200  $\text{J}/\text{mm}^3$ ). Para a camada de 60 micrômetros, por outro lado, a velocidade de 1000  $\text{mm}/\text{s}$  gerou DVE baixos (abaixo de 40  $\text{J}/\text{mm}^3$ ) e esses experimentos também foram desconsiderados, totalizando 54 amostras que foram fabricadas e analisadas, no apêndice A está detalhado a distribuição dos parâmetros e a DVE de cada amostra.

Após a fabricação das amostras, estas foram removidas do substrato por eletroerosão a fio em uma Agie Charmilles CUT 20 P e seguiu para o ensaio de densidade por Arquimedes. Este foi feito em uma balança da Mettler Toledo com etanol a temperatura ambiente com duas repetições para avaliação de densidade de cada amostra.

O ensaio de rugosidade foi realizado no equipamento Taylor Robson Talysurf 60 seguindo a norma ISO/ASTM DIS 52902:2018 em uma seção plana de 10 mm de comprimento e velocidade de medição de 0,5  $\text{mm}/\text{s}$ . A medição foi feita em todos os quatro lados verticais de cada amostra na direção de fabricação das camadas e foi analisada a rugosidade Ra dessas superfícies das amostras.

O ensaio de porosidade por imagem foi feito após o corte, embutimento em resina e preparação metalográfica da superfície central interna. O equipamento utilizado para realizar as imagens para o ensaio de porosidade e de defeitos foi o microscópio óptico da Zeiss e para processamento destas o software ImageJ®.

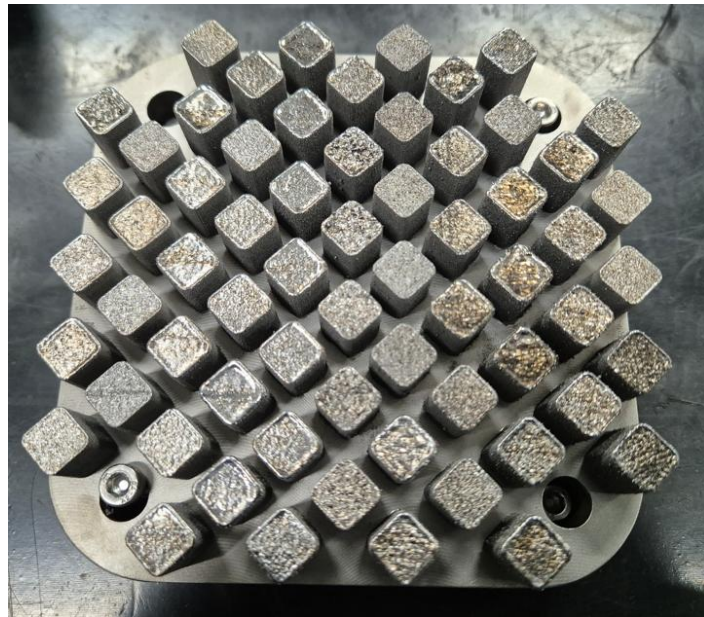
As amostras que obtiveram a maior densidade por Arquimedes e por imagem, não apresentaram trincas nem porosidade por falta de fusão e com a menor

rugosidade superficial foram selecionadas como os melhores conjuntos de parâmetros para cada espessura de camada.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O posicionamento das amostras foi realizado a partir do número de cada especificado no apêndice A de forma que a fabricação ocorresse em ordem inversa ao fluxo de gás para evitar que as fuligens do processo interfiram no leito de pó ainda não processado. Todas as 54 amostras propostas foram fabricadas, a fabricação durou 11 horas e 26 minutos, com a concentração máxima de oxigênio durante o processo de 0,1%. A Figura 2 apresenta a fabricação após a retirada da máquina.

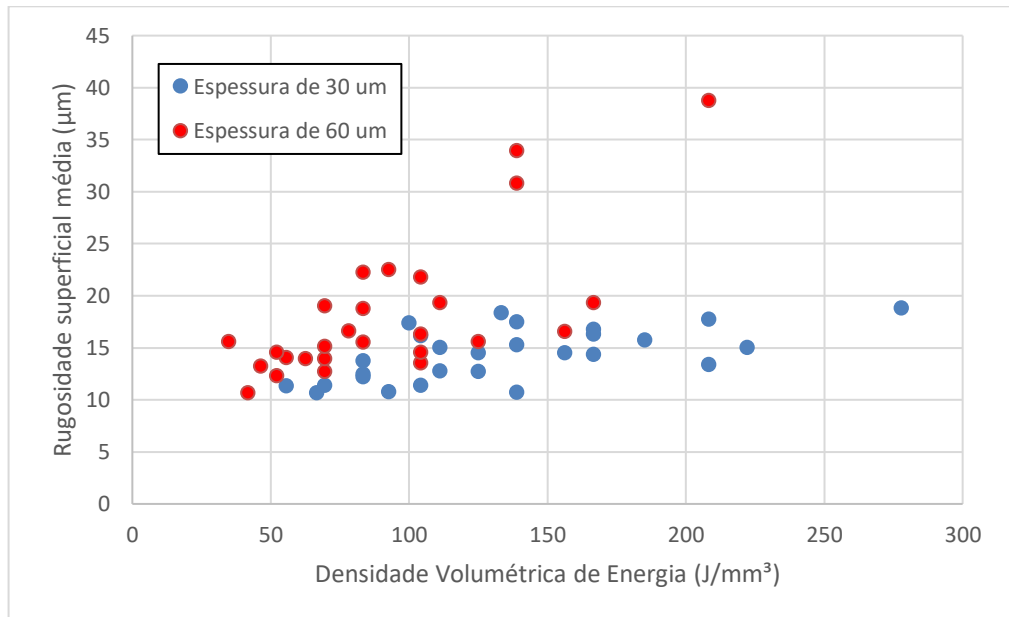
Figura 2– Amostras fabricadas



Fonte: Autor

Os resultados das medições da rugosidade superficial em relação ao DVE das amostras estão apresentados na Figura 3.

Figura 3 – Resultados da rugosidade Ra em relação a DVE



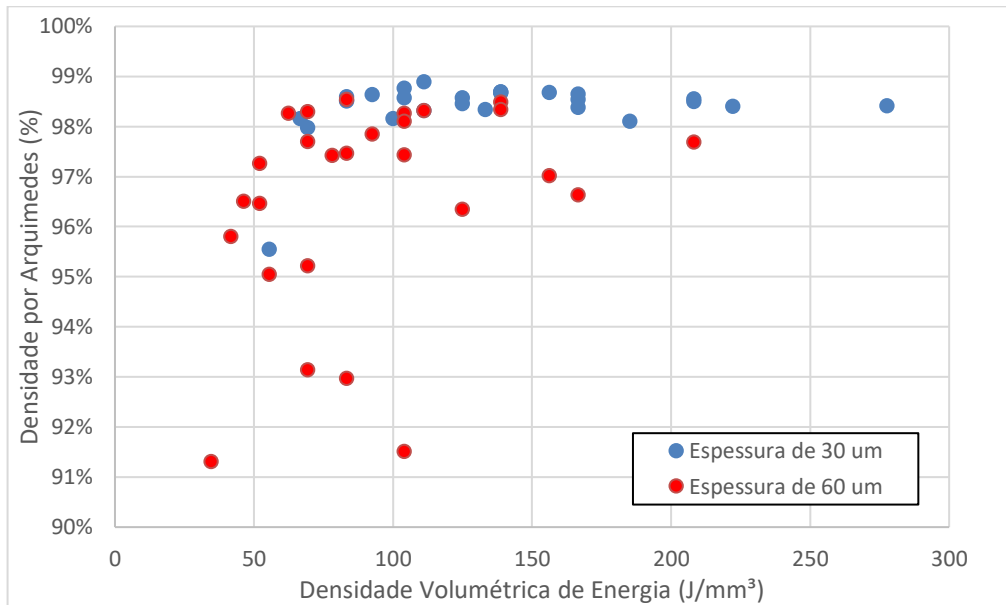
Fonte: Autor

As amostras de espessura de camada de 60  $\mu\text{m}$  apresentaram uma maior dispersão entre os resultados. No entanto, não foi possível identificar uma relação entre os parâmetros de fabricação, representados pela DVE, e a rugosidade superficial das amostras fabricadas. O resultado de rugosidade para as amostras com 30 micrômetros de espessura de fabricação está na região entre 10  $\mu\text{m}$  e 20  $\mu\text{m}$ . Nas fabricadas por 60 micrômetros é possível identificar amostras que têm um valor de rugosidade superior a 20  $\mu\text{m}$ , porém este pode estar associado a formação de bolhas que foram possíveis de observar na superfície de algumas amostras, além da porosidade por falta de fusão que podem influenciar na medição.

A rugosidade superficial em componentes fabricados por manufatura aditiva pode ser controlada para atingir valores específicos através de métodos de pós processamento como usinagem e polimento. O processo de L-PBF permite ainda adicionar parâmetros específicos para o contorno interno e externo que auxiliam no controle da rugosidade superficial.

Os resultados das medições da densidade pelo método de Arquimedes em relação a DVE das amostras podem ser observados na Figura 4.

Figura 4 – Resultado da densidade por Arquimedes em relação a DVE



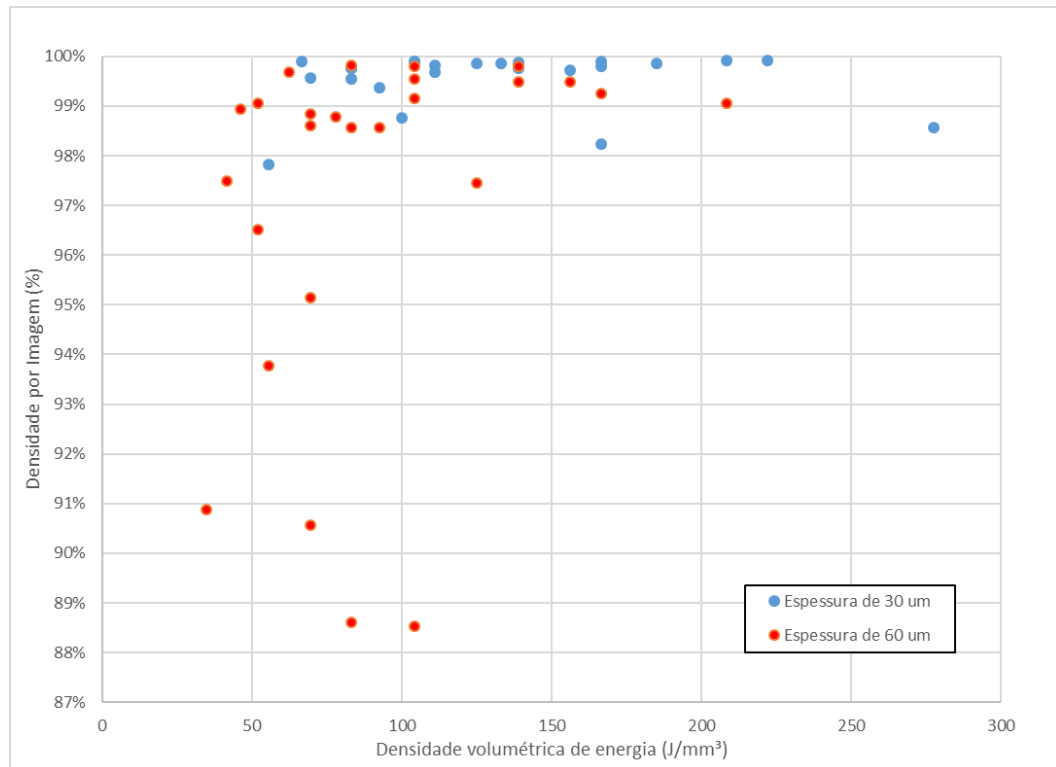
Fonte: Autor

A densidade das amostras foi comparada com a densidade da silicoferrita com 3,4% de massa em silício indicada por Smithells (1976) de 7,86 g/cm<sup>3</sup>. No entanto, não foi realizada a picnometria do pó, nem composição química após a fabricação o que pode alterar a densidade do material e este não ficar totalmente compatível com o valor de referência. Nas medições de densidade por Arquimedes é possível observar que todos os parâmetros propostos foram fabricados e resultaram em amostras sólidas cuja densidade está acima de 90%. Pode-se observar que os maiores resultados estão concentrados dentro da faixa de 80 J/mm<sup>3</sup> a 140 J/mm<sup>3</sup> com resultados de densidade relativa superiores a 98,50%.

Os resultados das medições da porosidade por imagem em relação ao DVE das amostras estão apresentados na Figura 5.



Figura 3 – Resultado da densidade por imagem em relação a DVE

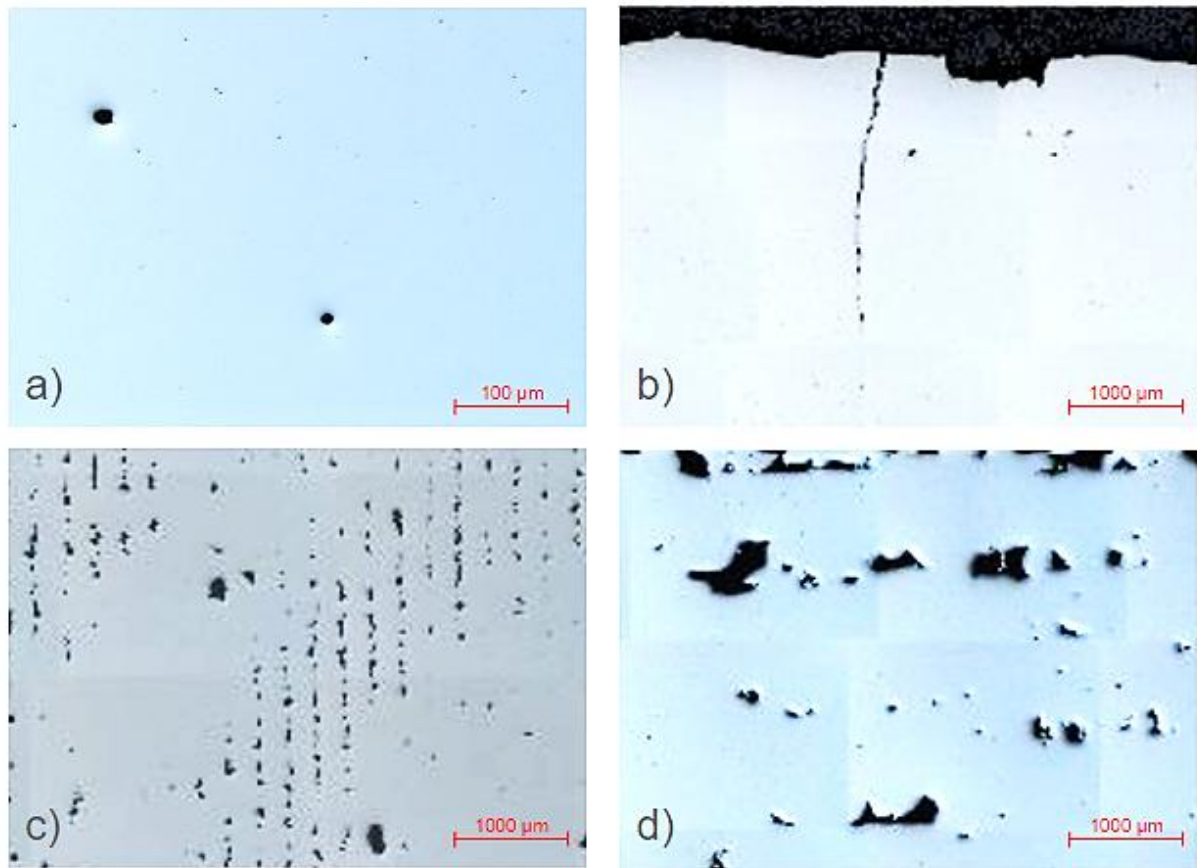


Fonte: Autor

Foi possível obter resultados de densidade acima de 99,5% para a espessura de camada de 30 µm e de 60 µm. O maior valor de densidade alcançado foi 99,89% para a amostra com DVE de 104,17 J/mm<sup>3</sup>, seus parâmetros de fabricação foram de espessura de camada de 30 µm, potência de 200 W, distância entre filetes de 0,08 mm e velocidade de 800 mm/s. O menor resultado foi de 88,60% para a amostra com DVE de 83,33 J/mm<sup>3</sup>, seus parâmetros de fabricação foram de espessura de camada de 60 µm, potência de 200 W, distância entre filetes de 0,10 mm e velocidade de 400 mm/s. Observa-se que a janela de processamento para amostras com espessura de 30 µm é ampla, no entanto as amostras com 60 µm apresentam maiores dificuldades e uma janela estreita, porém é possível obter amostras com valores de densidade acima de 99,5% apesar de em menor quantidade.

Observa-se diferentes tipos de defeitos nas amostras fabricadas: trincas, porosidades irregulares e porosidades esféricas. A Figura 6 apresenta cada um dos defeitos observados em diferentes amostras.

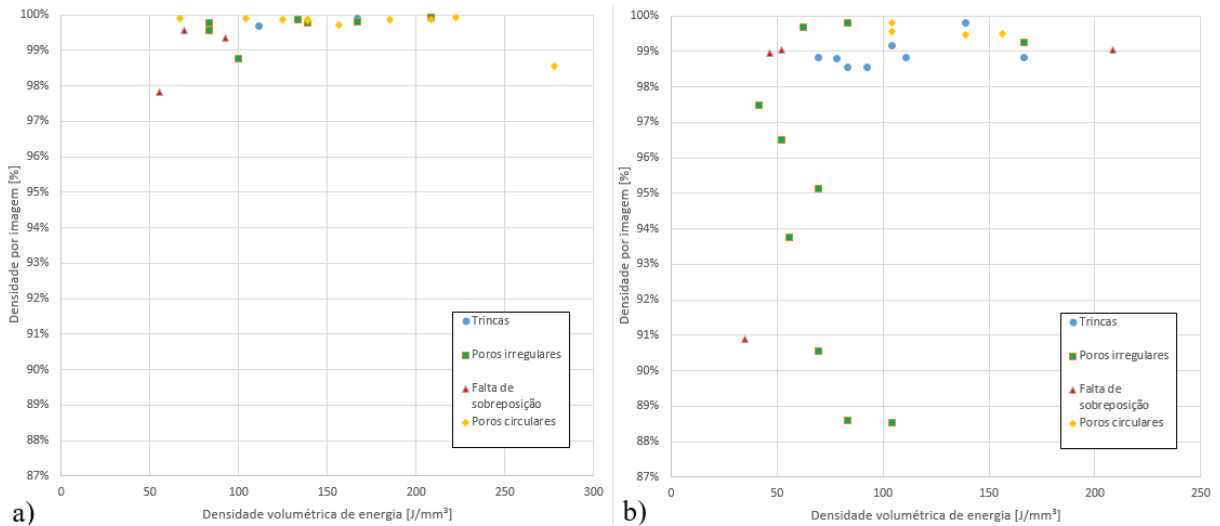
Figura 4 – Principais defeitos observados nas amostras, sendo estes a) Poros esféricos, b) Trinca, c) Poros irregulares por falta de sobreposição de filetes e d) Poros irregulares por falta de fusão



Fonte: Autor

Entre os defeitos observados, a presença de poros esféricos é aquela que ocorre em menor dimensão e em espaços mais isolados logo amostras que contém apenas este defeito obtêm maiores valores de densidade relativa. A Figura 7 apresenta um gráfico que mostra o principal defeito observado na amostra em relação a sua densidade relativa e ao DVE associado aos parâmetros de fabricação.

Figura 5 – Dispersão do principal defeito observado na amostra em relação ao DVE onde a) Amostras com 30  $\mu\text{m}$  de espessura e b) Amostras com 60  $\mu\text{m}$  de espessura



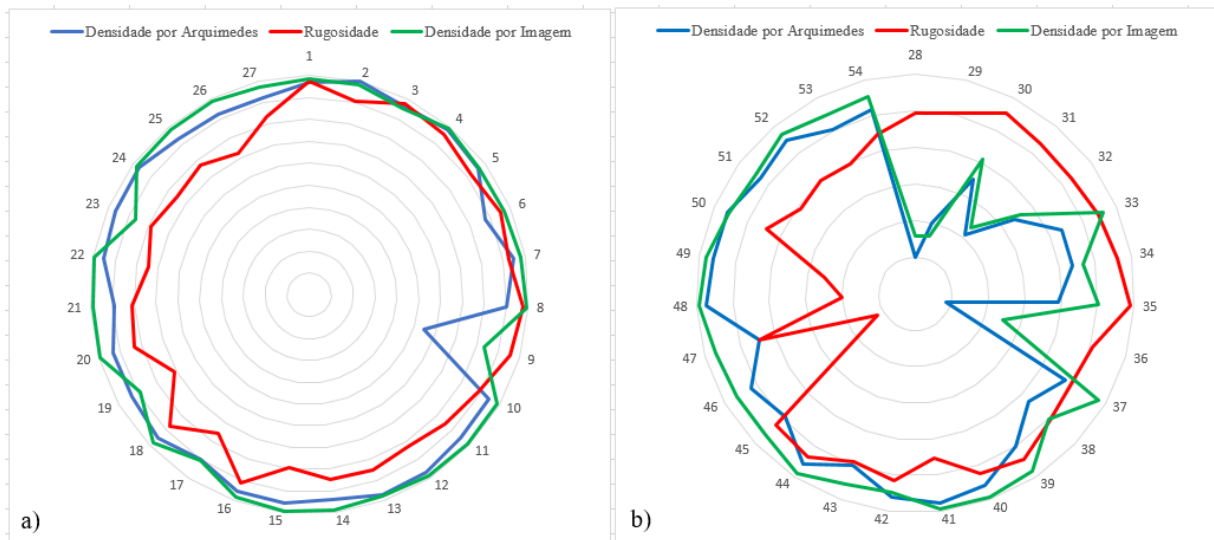
Fonte: Autor

Defeitos que ocasionam poros irregulares como a falta de fusão e a falta de sobreposição ocorre principalmente em amostra com baixo DVE. O efeito dos poros irregulares com padrão vertical ou falta de sobreposição, como indicado na figura 6c, está associado a valores de distância entre filetes de 0,12 mm. É provável que este efeito ocorra por causa da largura da poça de fusão produzida por esse conjunto de parâmetros não sendo o suficiente para preencher esse valor. Este efeito é mitigado em amostras com potências mais altas, com maiores valores de potência mais energia é direcionada ao filete.

O defeito de trinca pode ser observado nas direções horizontal e vertical e este ocorre principalmente em amostras fabricadas com a espessura de 60  $\mu\text{m}$  e valor de potência de 400W, porém não tem associação direta com o valor de DVE.

Os resultados obtidos por todas as 54 amostras estão sendo apresentadas na Figura 8. Neste gráfico entende-se a melhor amostra aquela que tem o maior valor dos três resultados. O valor indicado equivale ao número da amostra sendo analisada conforme apêndice A.

Figura 6 – Síntese dos resultados de a) Amostras com espessura de camada de 30  $\mu\text{m}$  e b) Amostras com espessura de 60  $\mu\text{m}$



Fonte: Autor

Para normalização dos resultados foi atribuído ao menor valor obtido a nota 0 e ao maior valor obtido a nota 10 e feito a equivalência para o restante dos resultados. Uma vez que a rugosidade é um parâmetro onde busca-se o menor valor, foi atribuída a nota 10 ao valor mínimo e a nota 0 ao maior valor obtido.

As amostras fabricadas com espessura de camada com 60  $\mu\text{m}$  obtiveram resultados com alta dispersão em todos os ensaios realizados indicando que esta obtém uma janela de processamento menor. Apesar disso, foi possível obter uma amostra fabricada com espessura de camada de 60  $\mu\text{m}$  com resultados satisfatórios. É possível observar na Figura 8b que a amostra do experimento com 60  $\mu\text{m}$  que apresentou o maior resultado foi a amostra 40 de DVE de 104,17  $\text{J}/\text{mm}^3$ , que foi fabricada com os parâmetros de potência de 300 W, distância entre filetes de 0,08 mm e velocidade de 600 mm/s. Esta apresentou resultados de densidade por Arquimedes de 7,547  $\text{g}/\text{cm}^3$  ou 98,27%, rugosidade  $R_a$  de 14,571 mm, densidade por imagem de 99,80% e apresenta somente poros esféricos.

A amostra que apresentou o melhor conjunto de parâmetros conforme Figura 8a foi a amostra 4 fabricada com espessura de camada de 30  $\mu\text{m}$  com DVE de 104,17  $\text{J}/\text{mm}^3$ , esta foi fabricada com os parâmetros de fabricação de potência de 300 W, distância entre filetes de 0,08 mm e velocidade de 600 mm/s. Esta apresentou resultados de densidade por Arquimedes de 7,585  $\text{g}/\text{cm}^3$  ou 98,76%, rugosidade  $R_a$  de 10,656 mm, densidade por imagem de 99,89% e apresenta somente poros esféricos.

#### 4. CONSIDERAÇÃO FINAL

O objetivo deste trabalho foi estudar como os parâmetros de velocidade de varredura, potência do laser e distância entre filetes influenciam sobre as propriedades do Fe-Si com 3,5% de massa de silício fabricado por L-PBF. Para avaliação foram

utilizados ensaios de rugosidade, densidade por Arquimedes e por imagem para encontrar um parâmetro de fabricação que seja denso e com baixa rugosidade. Para isso foi proposta a fabricação de 54 amostras com parâmetros de fabricação variados e analisado todas.

Com a fabricação de todas as amostras com os parâmetros propostas e após a avaliação foram encontradas amostras com pouco defeitos para ambas as espessuras de camada. Observaram-se vários defeitos associados aos parâmetros como valores elevados de distância entre filetes podem ocasionar defeito por falta de sobreposição e valores elevados de potência na espessura de camada de 60  $\mu\text{m}$  podem ocasionar trincas.

As amostras com o mesmo DVE apresentaram resultados e defeitos diferentes, portanto o DVE individualmente não é representativo e é necessário analisar o conjunto dos parâmetros para determinação da janela de processamento do material.

Para futuras pesquisas sugere-se a análise da microestrutura para avaliar como os parâmetros influenciam nas características magnéticas e de orientação de grãos e a fabricação de corpos de prova para avaliação das propriedades mecânicas das amostras fabricadas por L-PBF com os parâmetros desenvolvidos.

## REFERÊNCIAS

52900:2015, A. Standard Terminology for Additive Manufacturing – General Principles – Terminology. *ASTM International*, i, 1–9. 2015.

ISO/ASTM DIS 52902:2018. Additive manufacturing — Test artefacts — Standard guideline for geometric capability assessment of additive manufacturing systems, 17-19. 2018.

FELICIANO, F. R. **Development and Characterisation of Soft Magnetic Iron-Silicon Alloys for Laser Beam Powder Bed Fusion Additive Manufacturing**. 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia Física) – Universidade de Lisboa, Lisboa, 2023.

GARIBALDI, M., ASHCROFT, I., HILIER, N., HARMON, S. A. C., HAGUE, R. (2018). Relationship between laser energy input, microstructures and magnetic properties of selective laser melted Fe-6.9%wt Si soft magnets. **Materials Characterization**, v. 143, p. 144–151, 2018.

GIANOTTA, N., SALA, G., BIANCHINI, C., TORREGGIANI, A. A Review of Additive Manufacturing of Soft Magnetic Materials in Electrical Machines. **Machines**, v. 11, p. 1–23. 2023.

GOODALL, A. D., CHECHIK, L., LIVERA, F., TODD, I. Importance of surface roughness on the magnetic properties of additively manufactured FeSi thin walls. **Acta Materialia**, v. 263, 119501. 2024.

GU, D. D., MEINERS, W., WISSENBACH, K., POPRAWA, R., “Laser additive manufacturing of metallic components: materials, processes and mechanisms,” **International Materials Reviews**, vol. 57, no. 3, pp. 133–164, 2012.

LYRIO, M. S., AOTA, L. S., SANDIM, M. J. R., SANDIM, H. R. Z. Additive manufacturing of Fe-3.5 wt.-%Si electrical steel via laser powder bed fusion and subsequent thermomechanical processing. **Journal of Materials Science**, v. 59(9), p. 4019–4038. 2024.

MUNHOZ, A. L. J., COSTA, C. A., AHRENS, C. H., CARVALHO, J. de, SANTOS, J. R. L. dos, SILVA, J. V. L. da, FOGGIATTO, J. A., LIMA, M. S. F. de, VOLPATO, N. **Manufatura Aditiva: Tecnologias e Aplicações Da Impressão 3D**. São Paulo: Blucher, 2017.

NG, G. K. L., JARFORS, A. E. W., BI, G., & ZHENG, H. Y. Porosity formation and gas bubble retention in laser metal deposition. **Applied Physics A: Materials Science and Processing**, v. 97(3), p. 641–649. 2009.

RODRIGUEZ-VARGAS, B. R., STORNELLI, G., FOLGARAIT, P., RIDOLFI, M. R., MIRANDA PÉREZ, A. F., DI SCHINO, A. Recent Advances in Additive Manufacturing of Soft Magnetic Materials: A Review. **Materials**, v. 16(16). 5610. 2023.

SCIPIONI, U.; WOLFER, A. J.; MATTHEWS M. J.; DELPLANQUE J. R.; SCHOENUG J. M. On the limitations of Volumetric Energy Density as a design parameter for Selective Laser Melting, **Materials & Design**, vol. 113, pp. 331–340, 2017.

SMITHEL, C.J. **Metals Reference Book**. 5. ed. Butterworths: London and Boston. 1976.

YAP, C. Y.; CHUA, C. K.; DONG, Z. L. An effective analytical model of selective laser melting, **Virtual and Physical Prototyping**, vol. 11:1, p. 20–26, 2016.

## APÊNDICES

## APÊNDICE A – Tabela de parâmetros analisados e seus resultados

| Amostra | Espessura de camada [mm] | Potência do laser [W] | Velocidade de varredura [mm/s] | Hatch Distance [mm] | DVE [ $\mu\text{m}^3$ ] | Arquimedes | Rugosidade | Densidade por Imagem |
|---------|--------------------------|-----------------------|--------------------------------|---------------------|-------------------------|------------|------------|----------------------|
| 1       | 0,03                     | 200                   | 600                            | 0,08                | 138,89                  | 98,69%     | 10,742     | 99,84%               |
| 2       | 0,03                     | 200                   | 600                            | 0,10                | 111,11                  | 98,89%     | 12,781     | 99,81%               |
| 3       | 0,03                     | 200                   | 600                            | 0,12                | 92,59                   | 98,63%     | 10,787     | 99,36%               |
| 4       | 0,03                     | 200                   | 800                            | 0,08                | 104,17                  | 98,76%     | 11,365     | 99,89%               |
| 5       | 0,03                     | 200                   | 800                            | 0,10                | 83,33                   | 98,60%     | 12,446     | 99,55%               |
| 6       | 0,03                     | 200                   | 800                            | 0,12                | 69,44                   | 97,97%     | 11,396     | 99,57%               |
| 7       | 0,03                     | 200                   | 1000                           | 0,08                | 83,33                   | 98,51%     | 12,231     | 99,75%               |
| 8       | 0,03                     | 200                   | 1000                           | 0,10                | 66,67                   | 98,16%     | 10,656     | 99,90%               |
| 9       | 0,03                     | 200                   | 1000                           | 0,12                | 55,56                   | 95,55%     | 11,332     | 97,83%               |
| 10      | 0,03                     | 300                   | 600                            | 0,08                | 208,33                  | 98,50%     | 13,378     | 99,87%               |
| 11      | 0,03                     | 300                   | 600                            | 0,10                | 166,67                  | 98,54%     | 14,351     | 99,90%               |
| 12      | 0,03                     | 300                   | 600                            | 0,12                | 138,89                  | 98,65%     | 15,276     | 99,87%               |
| 13      | 0,03                     | 300                   | 800                            | 0,08                | 156,25                  | 98,68%     | 14,531     | 99,71%               |
| 14      | 0,03                     | 300                   | 800                            | 0,10                | 125,00                  | 98,46%     | 14,517     | 99,86%               |
| 15      | 0,03                     | 300                   | 800                            | 0,12                | 104,17                  | 98,58%     | 16,179     | 99,89%               |
| 16      | 0,03                     | 300                   | 1000                           | 0,08                | 125,00                  | 98,57%     | 12,697     | 99,76%               |
| 17      | 0,03                     | 300                   | 1000                           | 0,10                | 100,00                  | 98,16%     | 17,387     | 98,77%               |
| 18      | 0,03                     | 300                   | 1000                           | 0,12                | 83,33                   | 98,52%     | 13,762     | 99,76%               |
| 19      | 0,03                     | 400                   | 600                            | 0,08                | 277,78                  | 98,41%     | 18,810     | 98,56%               |
| 20      | 0,03                     | 400                   | 600                            | 0,10                | 222,22                  | 98,40%     | 15,025     | 99,92%               |
| 21      | 0,03                     | 400                   | 600                            | 0,12                | 185,19                  | 98,10%     | 15,759     | 99,86%               |
| 22      | 0,03                     | 400                   | 800                            | 0,08                | 208,33                  | 98,55%     | 17,740     | 99,93%               |
| 23      | 0,03                     | 400                   | 800                            | 0,10                | 166,67                  | 98,64%     | 16,321     | 98,24%               |
| 24      | 0,03                     | 400                   | 800                            | 0,12                | 138,89                  | 98,67%     | 17,465     | 99,77%               |
| 25      | 0,03                     | 400                   | 1000                           | 0,08                | 166,67                  | 98,38%     | 16,758     | 99,80%               |
| 26      | 0,03                     | 400                   | 1000                           | 0,10                | 133,33                  | 98,34%     | 18,352     | 99,87%               |
| 27      | 0,03                     | 400                   | 1000                           | 0,12                | 111,11                  | 98,32%     | 15,013     | 99,68%               |
| 28      | 0,06                     | 200                   | 400                            | 0,08                | 104,17                  | 91,51%     | 16,303     | 88,54%               |
| 29      | 0,06                     | 200                   | 400                            | 0,10                | 83,33                   | 92,97%     | 15,518     | 88,60%               |
| 30      | 0,06                     | 200                   | 400                            | 0,12                | 69,44                   | 95,21%     | 12,720     | 95,15%               |
| 31      | 0,06                     | 200                   | 600                            | 0,08                | 69,44                   | 93,14%     | 13,962     | 90,56%               |
| 32      | 0,06                     | 200                   | 600                            | 0,10                | 55,56                   | 95,05%     | 14,073     | 93,77%               |
| 33      | 0,06                     | 200                   | 600                            | 0,12                | 46,30                   | 96,51%     | 13,218     | 98,94%               |
| 34      | 0,06                     | 200                   | 800                            | 0,08                | 52,08                   | 96,47%     | 12,296     | 96,51%               |
| 35      | 0,06                     | 200                   | 800                            | 0,10                | 41,67                   | 95,81%     | 10,684     | 97,48%               |
| 36      | 0,06                     | 200                   | 800                            | 0,12                | 34,72                   | 91,31%     | 15,608     | 90,88%               |
| 37      | 0,06                     | 300                   | 400                            | 0,08                | 156,25                  | 97,04%     | 16,542     | 99,49%               |
| 38      | 0,06                     | 300                   | 400                            | 0,10                | 125,00                  | 96,35%     | 15,577     | 97,46%               |
| 39      | 0,06                     | 300                   | 400                            | 0,12                | 104,17                  | 97,43%     | 13,565     | 99,55%               |
| 40      | 0,06                     | 300                   | 600                            | 0,08                | 104,17                  | 98,27%     | 14,571     | 99,80%               |
| 41      | 0,06                     | 300                   | 600                            | 0,10                | 83,33                   | 98,54%     | 18,765     | 99,82%               |
| 42      | 0,06                     | 300                   | 600                            | 0,12                | 69,44                   | 98,30%     | 15,157     | 98,60%               |
| 43      | 0,06                     | 300                   | 800                            | 0,08                | 78,13                   | 97,42%     | 16,597     | 98,78%               |
| 44      | 0,06                     | 300                   | 800                            | 0,10                | 62,50                   | 98,26%     | 13,965     | 99,69%               |
| 45      | 0,06                     | 300                   | 800                            | 0,12                | 52,08                   | 97,26%     | 14,564     | 99,05%               |
| 46      | 0,06                     | 400                   | 400                            | 0,08                | 208,33                  | 97,69%     | 38,782     | 99,05%               |
| 47      | 0,06                     | 400                   | 400                            | 0,10                | 166,67                  | 96,63%     | 19,314     | 99,25%               |
| 48      | 0,06                     | 400                   | 400                            | 0,12                | 138,89                  | 98,49%     | 33,929     | 99,80%               |
| 49      | 0,06                     | 400                   | 600                            | 0,08                | 138,89                  | 98,33%     | 30,835     | 99,48%               |
| 50      | 0,06                     | 400                   | 600                            | 0,10                | 111,11                  | 98,32%     | 19,309     | 98,84%               |
| 51      | 0,06                     | 400                   | 600                            | 0,12                | 92,59                   | 97,84%     | 22,529     | 98,57%               |
| 52      | 0,06                     | 400                   | 800                            | 0,08                | 104,17                  | 98,11%     | 21,813     | 99,15%               |
| 53      | 0,06                     | 400                   | 800                            | 0,10                | 83,33                   | 97,47%     | 22,231     | 98,56%               |
| 54      | 0,06                     | 400                   | 800                            | 0,12                | 69,44                   | 97,70%     | 19,027     | 98,84%               |

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a UFSC pelo apoio, ao Instituto SENAI de Inovação em Sistemas de Manufatura e Processamento a Laser pela infraestrutura na realização da fabricação e dos ensaios e a USP-Lorena pelo fornecimento do material para fabricação.