

## COMPARAÇÃO DE PEÇAS MANUFATURADAS POR FUSÃO SELETIVA A LASER A PARTIR DE PÓS ESFÉRICOS E IRREGULARES DA LIGA TI53NB\*

*Jhoan Sebastian Guzmán Hernández*<sup>1</sup>

*Rafael de Moura Nobre*<sup>2</sup>

*Daniel Luiz Rodrigues Júnior*<sup>3</sup>

*Enzo Rozenti Nunes*<sup>4</sup>

*Daniel Leal Bayerlein*<sup>5</sup>

*Railson Bolsoni Falcão*<sup>6</sup>

*Edwin Sallica Leva*<sup>7</sup>

*Henrique Rodrigues Oliveira*<sup>8</sup>

*Victor Lira Chastinet*<sup>9</sup>

*Fernando José Gomes Landgraf*<sup>10</sup>

### Resumo

As novas tecnologias de manufatura aditiva estão sendo amplamente aplicadas para a fabricação de materiais em diferentes áreas. Para os materiais metálicos, as tecnologias de leito de pó, entre elas a fusão seletiva a laser (FSL), são as mais utilizadas. Devido a sua alta escoabilidade, é comum que a matéria prima utilizada seja o pó esférico e não o pó irregular. No entanto, o processo de produção de pós esféricos é custoso. A liga Ti53Nb é amplamente empregada na fabricação de materiais supercondutores. Além disso, sua alta biocompatibilidade e baixo módulo de elasticidade apresentam um grande potencial para a fabricação de implantes médicos pelo processo de FSL. Este trabalho visa comparar peças fabricadas por FSL a partir dos pós esféricos e irregulares da liga Ti53Nb, utilizando parâmetros iguais de potência do feixe de laser e velocidade de varredura e diferentes níveis de oxigênio na câmara de fabricação. Para esse fim, foram medidas densidade, dureza e teor de oxigênio e nitrogênio das amostras. Também foi realizada uma comparação entre as diferentes microestruturas obtidas no processo. Encontrou-se que os parâmetros para obter peças de alta densidade dependem da morfologia dos pós e é possível obter alta densidade com altos níveis de oxigênio.

**Palavras-chave:** Fusão seletiva a laser; Ti53Nb; Pó angular; Pó irregular.

### COMPARISON OF MANUFACTURED SAMPLES BY SELECTIVE LASER MELTING FROM SPHERICAL AND IRREGULAR POWDERS OF THE TI53NB ALLOY

#### Abstract

Additive manufacturing (AM) new technologies are being widely applied for the fabrication of materials in different areas. For metallic materials, powder bed fusion technologies, including selective laser melting (SLM), are the most used. Due to its high flowability, it is common that the used raw material is spherical powder and not irregular powder. However, the production process of spherical powders is expensive. The Ti53Nb alloy is extensively employed on the fabrication of superconducting materials. Moreover, its high biocompatibility and low elastic modulus present a great potential for the fabrication of medical implants through SLM process. This work aims to compare SLM manufactured samples fabricated with spherical and irregular powders of the Ti53Nb alloy, by using the same parameters of power and scanning speed of the laser and different levels of oxygen inside the chamber of fabrication. To that end, measurements of density, hardness, oxygen and nitrogen of the samples were taken. It was also made a comparison among the different microstructures obtained on the process. It was found that the parameters to

obtain fully dense samples depend on the powder's morphologies and is possible to achieve high values of density, even with high values of oxygen.

**Keywords:** Selective laser melting; Ti53Nb; Spherical powder; Irregular powder.

- <sup>1</sup> *Engenheiro metalurgista, Estudante de mestrado, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais (PMT), Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil.*
- <sup>2</sup> *Tecnólogo em processos metalúrgicos, Estudante de mestrado, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais (PMT), Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil.*
- <sup>3</sup> *Tecnólogo em materiais processos e componentes eletrônicos, Doutor, Pós-doutorando, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais (PMT), Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil*
- <sup>4</sup> *Estudante de graduação, Departamento Engenharia Naval e Oceânica (PNV), Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil.*
- <sup>5</sup> *Engenheiro metalurgista, Estudante de Doutorado no Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), Centro de Tecnologia em Metalurgia e Materiais (CTMM), Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), São Paulo, SP, Brasil.*
- <sup>6</sup> *Físico, Doutor, Pós-doutorando, Centro de Tecnologia em Metalurgia e Materiais (CTMM), Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), São Paulo, SP, Brasil*
- <sup>7</sup> *Físico, Doutor, Pós-doutorando, Centro de Tecnologia em Metalurgia e Materiais (CTMM), Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), São Paulo, SP, Brasil*
- <sup>8</sup> *Engenheiro mecânico, Doutorando, Instituto SENAI de Inovação em Sistemas de Manufatura e Processamento a Laser, Joinville, SC, Brasil*
- <sup>9</sup> *Instituto SENAI de Inovação em Sistemas de Manufatura e Processamento a Laser, Joinville, SC, Brasil*
- <sup>10</sup> *Engenheiro metalurgista, Doutor, Professor titular, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais (PMT), Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil.*

## 1 INTRODUÇÃO

No final da década de 1980, um curioso princípio de fabricação de materiais baseado na adição ou deposição de material na forma de camadas foi apresentado. Esse tipo de fabricação foi chamado manufatura aditiva (MA), *additive manufacturing* em inglês, usualmente conhecido como impressão 3D (1).

De uma maneira geral, as etapas do processo de MA compreendem:

1. Aquisição de dados e modelagem tridimensional.
2. Obtenção do modelo geométrico 3D em um formato específico.
3. Planejamento do processo e a configuração de todas as variáveis de fabricação.
4. Fabricação da peça no equipamento.
5. Pós-processamento (2).

As principais vantagens oferecidas por este processo são:

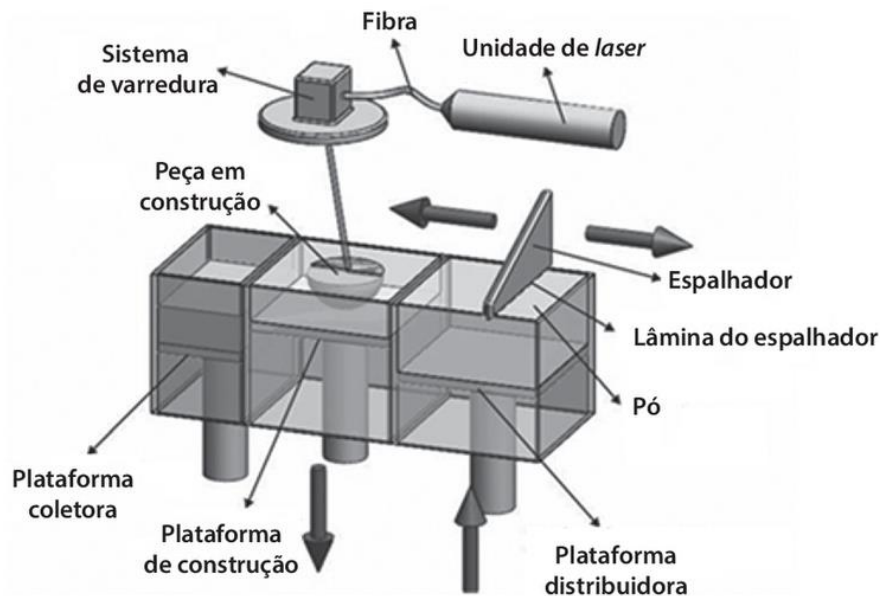
1. Alto grau de liberdade geométrica. É possível criar peças customizadas e de formas complexas, cuja fabricação não seria possível usando outra tecnologia.
2. É possível reutilizar a matéria prima, mas um controle de qualidade deve ser realizado.
3. As peças são manufaturadas em uma única etapa. Pós-processos podem ser realizados no mesmo equipamento.
4. São obtidas interessantes propriedades mecânicas devido às microestruturas obtidas por este processo.

As principais desvantagens são:

1. O custo é elevado, principalmente dos equipamentos e, quando é utilizado o pó, das matérias primas.
2. Defeitos de porosidade e de acabamento superficial são comuns, por isso devem ser realizados pós-processos.
3. O tamanho das peças e a velocidade de fabricação estão limitados ao tamanho da câmara de fabricação e à velocidade do laser (2–4).

A norma ISO/ASTM 52900:2015(E) (5), possivelmente a única norma estabelecida para MA, classifica as tecnologias baseadas em diferentes itens como, por exemplo, os princípios do processamento do material e a forma como é adicionada a matéria prima (fio ou pó). As tecnologias que utilizam o pó em leito são chamadas de fusão de leito de pó, *powder bed fusion* em inglês, a este grupo pertence à fusão seletiva a laser (FSL), *selective laser melting* em inglês.

Segundo o livro do Ian Gibson (1), o primeiro equipamento de FSL foi fabricado comercialmente na *University of Texas* em Austin, USA. Em geral, os equipamentos de FSL utilizam uma ou mais fontes térmicas para induzir a fusão das partículas, um método para controlar a fusão em regiões específicas do leito de pó, e um mecanismo para adicionar e distribuir o leito de pó. Um esquema do equipamento de FSL é apresentado na figura 1. Esta tecnologia foi originalmente desenvolvida para produzir plásticos e atualmente tem sido estendida para trabalhos com pó metálico e cerâmico. Amplas revisões sobre fabricação de peças de materiais metálicos a partir da FSL podem ser encontradas na literatura (4,6,7).



**Figura 1.** Diagrama esquemático do processo de fusão de leito de pó metálico que utiliza laser (2).

As principais variáveis na FSL são a potência do feixe de laser ( $P_L$ ), a velocidade de varredura ( $V_L$ ), a distância entre linhas de varredura ( $D_v$ ) e a espessura da camada de pó ( $E_c$ ). As duas primeiras são as que mais influenciam a densidade do material. Com estas variáveis é possível supor uma densidade de energia aparente para projetar uma janela de processamento. Outras variáveis importantes são a quantidade de oxigênio e o gás inerte utilizado dentro da câmara de fabricação de peças, a estratégia de varredura e a morfologia do pó (2,6–9). Cada variável influencia as propriedades do material de diferentes maneiras, por isso um conhecimento prévio da interação destas variáveis deve ser adquirido.

A potência do feixe de laser e a velocidade de varredura são variáveis críticas para a obtenção de peças com alta densidade, mais até do que a densidade de energia aparente. Usando diferentes combinações destes parâmetros é possível obter peças em 4 tipos de zonas na janela de processamento:

1. Zona de energia excessiva. Potência muito alta e a velocidade muito baixa, onde é impossível fabricar peças.
2. Zona de fusão excessiva. Potencia alta e velocidade baixa, mas é possível fabricar peças com porosidade esférica devido a gás capturado.
3. Zona de fusão incompleta. Potencia baixa e velocidade muito alta, as partículas de pó não fundem completamente e há presença de porosidade irregular e alta segregação.
4. Zona de alta densidade. A relação entre a potência e a velocidade é estável, sendo obtidas peças com densidades maiores a 99%. Nesta região é onde se busca trabalhar (10).

A estratégia de varredura é importante para tentar controlar a orientação dos grãos e diminuição da tensão residual (11,12). Segundo Chunlei Qiu Et al (13), a estratégia de varredura não tem um efeito importante na densidade em peças fabricadas dentro da zona de alta densidade.

Na FSL é comum o uso de pó de morfologia esférica como matéria prima (6). Este tipo de pó proporciona a formação de leitos de pó mais consistentes e, por consequência, menos pó soprado durante o processo de fusão devido ao fluxo de gás. Por outro lado, o pó de morfologia irregular reduz a densidade de empacotamento quando comparado com o pó esférico. O uso de uma ou da outra

morfologia causa uma variação dos parâmetros para obtenção de peças com alta densidade (14,15).

A liga Ti53Nb, inicialmente utilizada na fabricação de materiais supercondutores, foi produzida visando a fabricação de implantes pela técnica de FSL devido a sua biocompatibilidade e baixo módulo de elasticidade (16). Este trabalho compara peças fabricadas com pós esféricos e irregulares, utilizando as mesmas potências do feixe do laser e velocidade de varredura e variando a estratégia de varredura, a espessura da camada e os níveis de oxigênio na câmara de fabricação. Buscou-se achar principalmente a diferença entre as densidades das amostras.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste estudo, 4 amostras de Ti53Nb na forma de cubos (10x10x10 mm) foram fabricadas por FSL. Para esse fim, pó esférico produzido por atomização a plasma, fornecido pela empresa *Advanced Powders & Coatings* (AP&C), no Canadá, e pó irregular fabricado por processo de hidrogenação e desidrogenação, no Instituto de Pesquisas Tecnologias do Estado de São Paulo (IPT), foram utilizados. As morfologias dos pós esféricos e irregulares são observadas na figura 2. Densidade calculada, densidade aparente, teores iniciais de O e N, distribuição de tamanho de partículas e escoabilidade são apresentados na tabela 1.

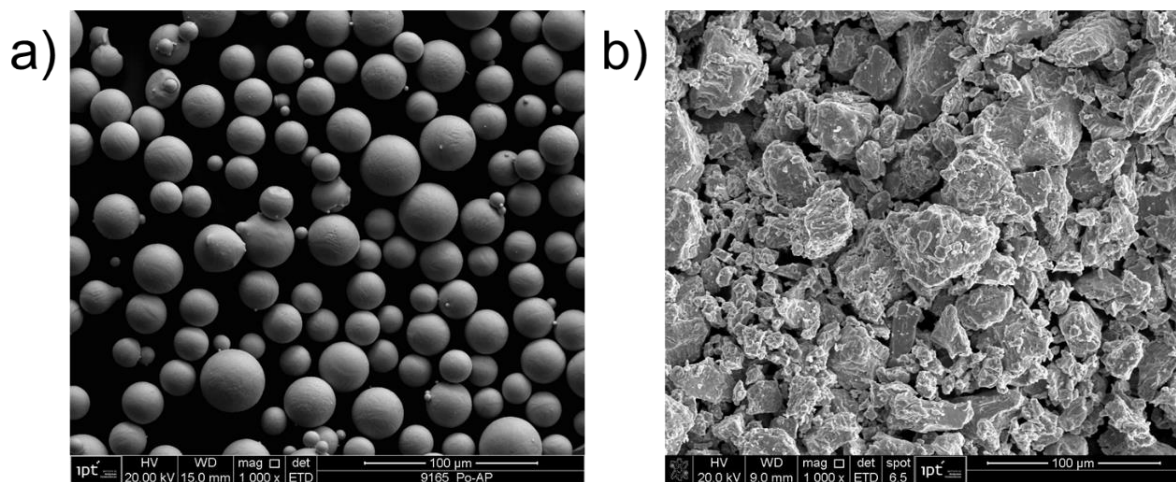


Figura 2. Morfologia dos pós. a) Pó esférico e b) Pó irregular.

Tabela 1. Características dos pós.

Matéria prima	$\rho_{DRX}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_a$ (mg/mm <sup>3</sup> )	O inicial (ppm)	N inicial (ppm)	D10 (µm)	D50 (µm)	D90 (µm)	Escoabilidade por funil Hall (s/50g)
Pó esférico	6,056	3,49	1200	209	19	31	51	20
Pó irregular	6,046	1,85	3400	430	12	31	67	Não apresenta

Onde  $\rho_{DRX}$  é a densidade calculada por difração de raios X (DRX) e  $\rho_a$  é a densidade aparente do pó.

As amostras foram fabricadas em um equipamento *Concept Laser M2* instalado no Instituto SENAI de Inovação em Laser, em Joinville, Brasil. Os níveis de oxigênio usados dentro da câmara de fabricação nas amostras fabricadas com o pó irregular variaram desde 0,4 até 0,6 % e para as amostras fabricadas com pó esférico foram menores a 0,1 %. A tabela 2 apresenta os parâmetros necessários

para calcular as densidades de energia volumétrica ( $D_{EV}$ ) e mássica ( $D_{EM}$ ), conforme as expressões:

$$D_{EV} = \frac{P_L}{V_L * D_V * E_C} \quad (1)$$

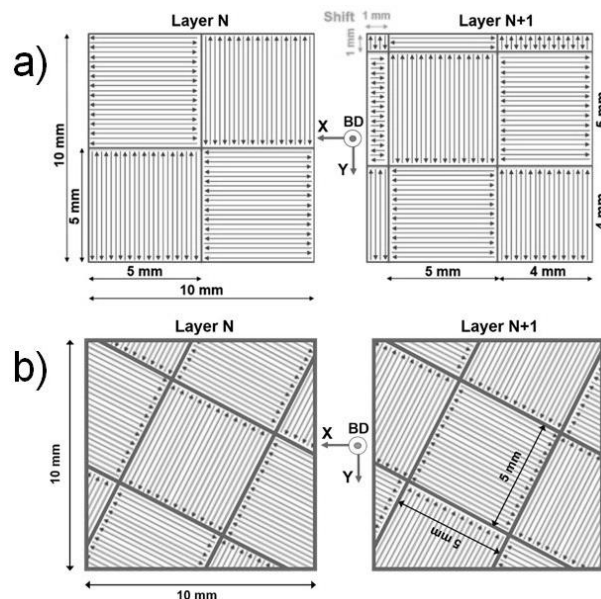
$$D_{EM} = \frac{D_{EV}}{\rho_a} \quad (2)$$

**Tabela 2.** Parâmetros de fabricação.

Amostra (Identificação Interna)	$P_L$ (W)	$V_L$ (mm/s)	$D_V$ ( $\mu\text{m}$ )	$E_C$ ( $\mu\text{m}$ )	$D_{EV}$ ( $\text{J}/\text{mm}^3$ )	$D_{EM}$ ( $\text{J}/\text{mg}$ )
1 (3-R10)	200	1000	105	30	63	18
2 (3-R22)	300	1000	105	30	95	27
3 (1-15P)	200	1000	105	60	32	17
4 (1-6F)	300	1000	105	60	48	26

As amostras 1 e 2 foram fabricadas com pó esférico e as amostras 3 e 4 com pó irregular.

As estratégias de varredura variaram. Para as amostras fabricadas com o pó esférico foi utilizada uma estratégia de varredura do tipo xadrez, com ilhas de 5x5 mm no plano principal. Em cada camada as varreduras dentro das ilhas variaram 90° e a nucleação de uma nova ilha se apresentou. Por outro lado, para as amostras fabricadas com pó irregular foi utilizada uma estratégia de varredura do tipo xadrez com ilhas de 5x5 mm inclinadas 67° no plano principal. Em cada camada as varreduras dentro das ilhas variaram 90°. A figura 3 apresenta as estratégias de varredura empregadas.



**Figura 3.** Estratégias de varredura a) para amostras fabricadas com pó esférico (amostras 1 e 2) e b) para amostras fabricadas com pó irregular (amostras 3 e 4).

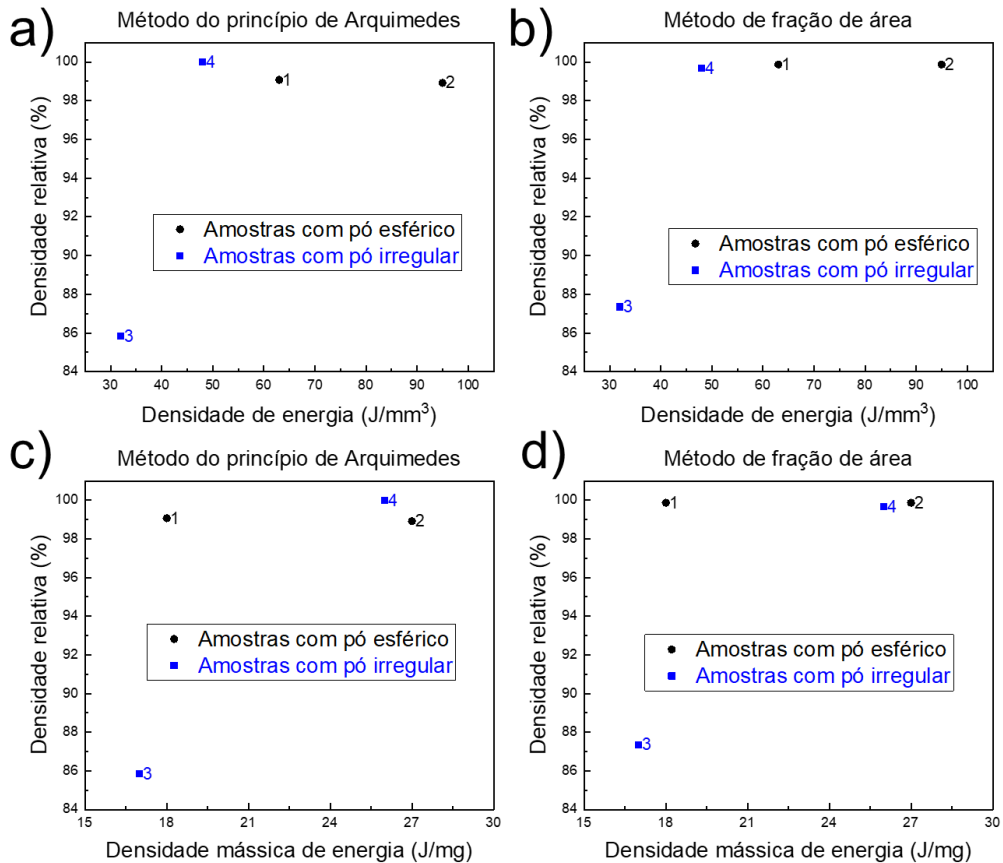
Medições de densidade hidrostática aplicando o princípio de Arquimedes foram determinadas segundo a norma da ASTM B962-17 (18), após lixamento da superfície dos cubos até a granulometria 1200. Também, a densidade relativa foi obtida a partir da fração de área do poro com o software Fiji (17) em 9 micrografias de diferentes zonas através do plano de crescimento a 50X. Para isso, as amostras foram polidas com uma mistura de sílica coloidal e peróxido de hidrogênio até lograr uma superfície espelhada. A densidade relativa utilizando os dois métodos, foi

calculada baseada nos valores de densidade calculados por DRX de cada pó apresentados na tabela 1.

A microestrutura das amostras foi analisada e foi observada a influência dos parâmetros na densidade das peças. Um microscópio ótico ZEISS Axio Observer.z1m e um microscópio eletrônico de varredura (MEV) FEG Inspect 50 foram utilizados para este fim. As medidas de micro-dureza foram realizadas em um equipamento DuraScan 70 com indentação Vickers e uma carga de 200 g. Cada amostra foi medida em média 10 vezes em diferentes localizações por 15 segundos. Os teores de oxigênio e nitrogênio das amostras foram determinados por fusão em atmosfera de gás inerte.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A figura 4 compara o comportamento dos dois tipos de pós, em relação aos resultados de densidade relativa obtidos utilizando densidade hidrostática e fração de área em função da densidade de energia volumétrica (figura 4a e 4b) e da densidade de energia mássica (figura 4c e 4d). Os valores de densidade de energia mássica dos dois tipos de pós são semelhantes, para igual potência. Isso ocorre, apesar da grande diferença de densidade aparente entre os pós, pois essa característica é compensada pela grande diferença na espessura das camadas. A amostra 3 apresentou densidade muito menor que as outras três. Esse resultado sugere que, enquanto a potência de 300W foi suficiente para garantir uma porosidade menor que 1%, a potência de 200W foi insuficiente para garantir a grande contração de solidificação exigida no caso dos pós irregulares, que é de 70%, quando comparada com a contração dos pós esféricos é de 43%, resultando numa porosidade de 13% na amostra produzida com pó irregular, e de 1% na amostra com pó esférico. Essa diferença aparece nitidamente na figura 5. Gong e colaboradores (10) e Qiu e colaboradores (13) expõem que a variável crítica para obter peças com alta densidade é a potência do laser.



**Figura 4.** Densidade relativa a) e c) obtida pelo método do princípio de Arquimedes e b) e d) pelo método de fração de área.

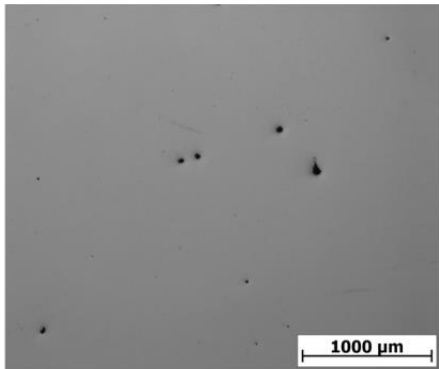
De forma geral, os resultados por ambos os métodos foram similares. No entanto, quando se utilizou a fração de área do poro foi necessário tomar medidas em mais de uma face da amostra para aumentar a representatividade das medidas. Mesmo assim, o uso de ambos métodos de forma complementar é recomendado.

Os resultados obtidos indicam alta densidade para as amostras fabricadas a partir do pó esférico. Já a amostra 3, fabricada a partir do pó irregular, apresentou uma baixa densidade. Estes resultados indicam que diferentes combinações de parâmetros devem ser utilizadas para a obtenção de peças com alta densificação dependendo da morfologia do pó de partida que é empregado (esférica ou irregular). No caso do pó irregular, a obtenção de amostras com altas densidades depende da aplicação de maiores potências, resultado associado à sua baixa escoabilidade e dissipação de calor.

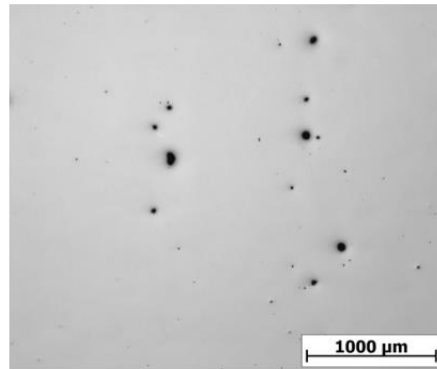
Na figura 5 é possível notar as diferentes morfologias dos defeitos de porosidade, porosidade esferoidal e porosidade irregular. A porosidade esferoidal é produzida por gás capturado durante a fusão, caso das amostras 1, 2 e 4. Já a porosidade irregular é produzida por falta de fusão devido à alta velocidade e a baixa potência do feixe do laser, este é o caso da amostra 3.



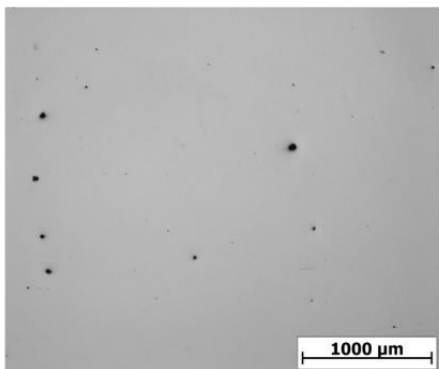
a) Amostra 2



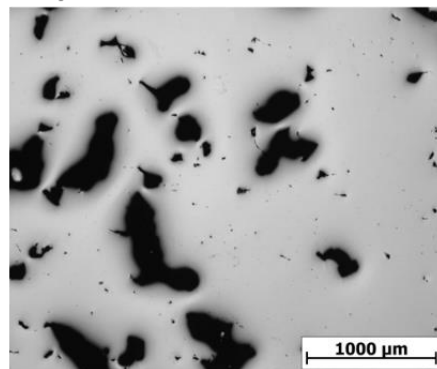
b) Amostra 4



c) Amostra 1



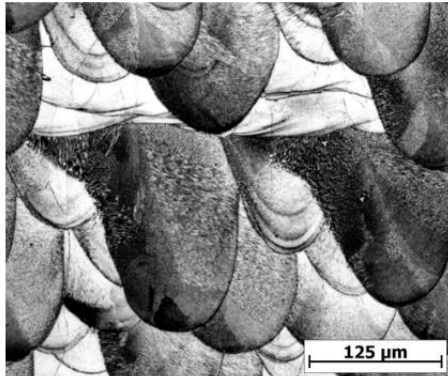
d) Amostra 3



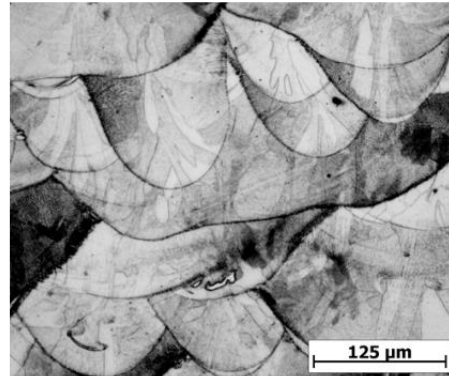
**Figura 5.** Amostras sem atacar. a) e c) amostras fabricadas a partir de pó esférico e b) e d) amostras fabricadas a partir de pó irregular.

A figura 6 apresenta as micrografias das amostras atacadas. A microestrutura das amostras é composta da fase  $\beta$ . As poças de fusão podem ser observadas devido a segregação nos seus contornos. É possível observar grãos de forma irregular na figura 6b dentro das poças de fusão. As poças de fusão apresentam diferentes dimensões dependendo da potência e da estratégia de varredura utilizadas. A amostra 3 da figura 6d apresentou segregação não uniforme devido à incompleta fusão.

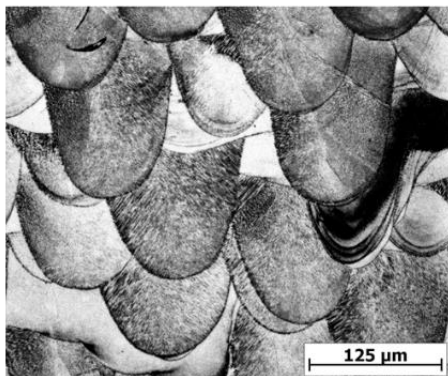
a) Amostra 2



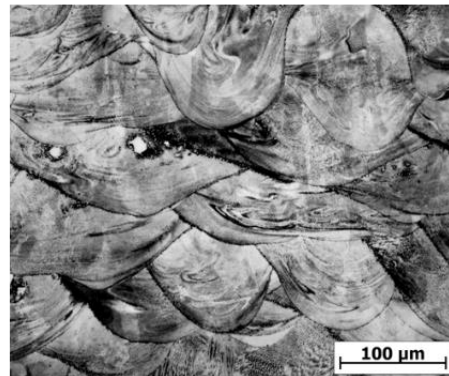
b) Amostra 4



c) Amostra 1



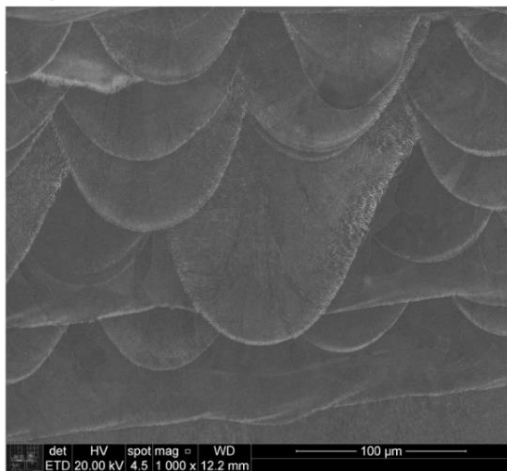
d) Amostra 3



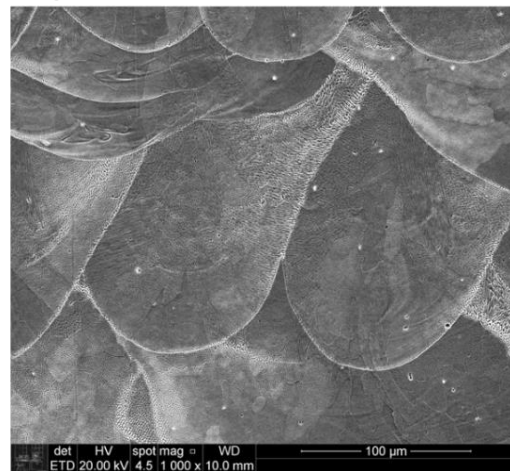
**Figura 6.** Micrografias atacadas. a) e c) amostras fabricadas a partir de pó esférico e b) e d) amostras fabricadas a partir de pó irregular.

As amostras 2 e 4 foram comparadas usando a técnica de MEV na figura 7. Ambas as amostras apresentam estrutura celular no interior das poças de fusão devido às altas taxas de resfriamento comum nos materiais fabricados por FSL (13,19). A estrutura celular é conformada por discordâncias e segregação. A segregação é mais evidente nos contornos das poças de fusão.

a) Amostra 2



b) Amostra 4



**Figura 7.** MEV das amostras 2 e 4 fabricadas a partir dos diferentes pós e os mesmos parâmetros de potência (300 W) e velocidade do laser (1000 mm/s). a) 1000 x e b) 1000 x.

As medições de dureza Vickers são apresentadas na figura 8 junto com medições dos teores de oxigênio e nitrogênio para as amostras 1 e 4. A dureza das amostras 3 e 4, fabricadas a partir do pó irregular e com níveis de oxigênio entre 0,4 e 0,6 % dentro da câmara de fabricação, foi superior (310 e 320 HV<sub>0,2</sub>, respectivamente) às durezas apresentadas pelas amostras 1 e 2, fabricadas a partir do pó esférico e com níveis de oxigênio menores a 0,1 % (189 e 186 HV<sub>0,2</sub> respectivamente). Os teores iniciais de oxigênio e nitrogênio no pó de morfologia irregular e o alto teor de oxigênio presente na câmara na manufatura das peças 3 e 4 influenciaram na dureza do material provocando endurecimento por solução sólida. A dureza das amostras 1 e 2 é maior do que aquela da liga Ti53Nb bruta de solidificação (160 HV<sub>0,2</sub>). O ganho de dureza daquelas amostras pode ser atribuído à microestrutura celular da solidificação no processo FSL, apresentada na figura 7, ou ao endurecimento por teor de oxigênio, já que o material bruto de solidificação tem 730ppm de oxigênio.

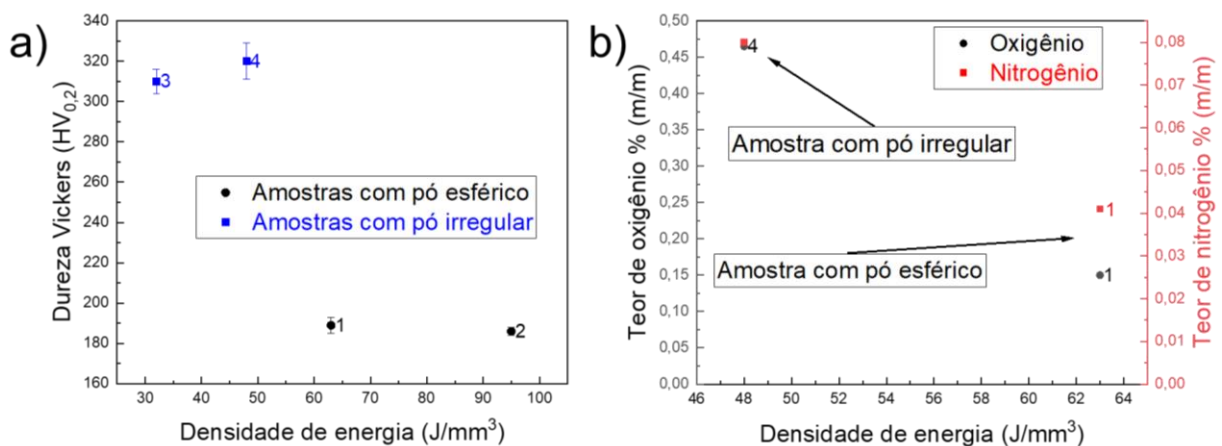


Figura 8. a) Dureza das amostras e b) teor de oxigênio e nitrogênio das amostras 1 e 4.

Estes resultados indicam que os parâmetros de fabricação de peças com alta densidade variam quando usados pós com morfologias diferentes. As microestruturas apresentam os mesmos microconstituintes, mas existe uma dependência da estratégia de varredura usada na morfologia das peças de fusão. Baixos níveis de oxigênio devem ser utilizados no intuito de evitar o excessivo endurecimento das peças. No entanto, um elevado teor de oxigênio não evitou a obtenção de peças com alta densidade como indicou a amostra 4.

#### 4 CONCLUSÕES

Apesar das diferentes condições de processamento utilizadas na fabricação das peças por FSL (diferentes níveis de oxigênio, estratégias de varredura e espessuras de camada) as seguintes conclusões podem ser feitas com relação à utilização de pós de diferentes morfologias (esférica e irregular) da liga Ti53Nb:

1. Os parâmetros de fabricação para obtenção de peças com alta densidade são diferentes quando são empregados pós com morfologias diferentes. Para pó irregular foi necessário usar potências mais altas do que 200 W.
2. Foi possível obter uma peça com alta densidade utilizando o pó irregular e teores altos de oxigênio dentro da câmara de fabricação de FSL.
3. A dureza das amostras 3 e 4 foi influenciada pelo alto teor de oxigênio do pó de morfologia irregular e o oxigênio dentro da câmara. As amostras 1 e 2 com

teores baixos de oxigênio apresentaram uma dureza (189 e 186 HV<sub>0,2</sub> respectivamente) maior do que a liga Ti53Nb bruta de solidificação (160 HV<sub>0,2</sub>).

## Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) (número do processo 2016/50199-6), Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração (CBMM), Associação de Assistência à Criança Deficiente (AACD) e a Empresa Brasileira de Pesquisa e Inovação Industrial (EMBRAPIL) por sua ajuda financeira.

## REFERÊNCIAS

1. Gibson I, Rosen D, Stucker B. Additive Manufacturing Technologies [Internet]. New York, NY: Springer New York; 2015. XXI, 498. Available from: <http://link.springer.com/10.1007/978-1-4939-2113-3>
2. Volpato N. MANUFATURA ADITIVA Tecnologias e aplicações da impressão 3D. Edgard Blücher Ltda., editor. 2017.
3. Hart J. An Introduction to Additive Manufacturing (Prof. John Hart, MIT) [Internet]. youtube. Available from: <https://www.youtube.com/watch?v=ICjQ0UzE2Ao&t=1665s>
4. Murr LE, Martinez E, Amato KN, Gaytan SM, Hernandez J, Ramirez DA, et al. Fabrication of Metal and Alloy Components by Additive Manufacturing: Examples of 3D Materials Science. J Mater Res Technol [Internet]. 2012 Apr;1(1):42–54. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2238785412700091>
5. ASTM. ISO / ASTM52900 - 15 Standard Terminology for Additive Manufacturing – General Principles – Terminology. 2015.
6. DebRoy T, Wei HL, Zuback JS, Mukherjee T, Elmer JW, Milewski JO, et al. Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties. Prog Mater Sci [Internet]. 2018 Mar;92:112–224. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0079642517301172>
7. Herzog D, Seyda V, Wycisk E, Emmelmann C. Additive manufacturing of metals. Acta Mater [Internet]. 2016 Sep;117:371–92. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359645416305158>
8. Smith CJ, Tammam-Williams S, Hernandez-Nava E, Todd I. Tailoring the thermal conductivity of the powder bed in Electron Beam Melting (EBM) Additive Manufacturing. Sci Rep [Internet]. 2017 Dec 5;7(1):10514. Available from: <http://www.nature.com/articles/s41598-017-11243-8>
9. Rubenchik AM, King WE, Wu SS. Scaling laws for the additive manufacturing. J Mater Process Technol [Internet]. 2018 Jul;257:234–43. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924013618300906>
10. Gong H, Rafi K, Gu H, Starr T, Stucker B. Analysis of defect generation in Ti–6Al–4V parts made using powder bed fusion additive manufacturing processes. Addit Manuf [Internet]. 2014 Oct;1–4:87–98. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2214860414000074>
11. Kruth J-P, Badrossamay M, E.Yasa, Deckers J, Thijs L, Humbeeck J Van. Part and material properties in selective laser melting of metals. In: 16th International Symposium on Electromachining (ISEM XVI) [Internet]. 2015. Available from:

- [https://www.researchgate.net/publication/266036449\\_Part\\_and\\_material\\_properties\\_in\\_selective\\_laser\\_melting\\_of\\_metals/stats](https://www.researchgate.net/publication/266036449_Part_and_material_properties_in_selective_laser_melting_of_metals/stats)
12. Vrancken B, Thijs L, Kruth J-P, Van Humbeeck J. Microstructure and mechanical properties of a novel  $\beta$  titanium metallic composite by selective laser melting. *Acta Mater* [Internet]. 2014 Apr;68:150–8. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359645414000275>
  13. Qiu C, Kindi M Al, Aladawi AS, Hatmi I Al. A comprehensive study on microstructure and tensile behaviour of a selectively laser melted stainless steel. *Sci Rep* [Internet]. 2018 Dec 17;8(1):7785. Available from: <http://www.nature.com/articles/s41598-018-26136-7>
  14. Spierings AB, Voegtlin M, Bauer T, Wegener K. Powder flowability characterisation methodology for powder-bed-based metal additive manufacturing. *Prog Addit Manuf* [Internet]. 2016 Jun 23;1(1–2):9–20. Available from: <http://link.springer.com/10.1007/s40964-015-0001-4>
  15. Attar H, Prashanth KG, Zhang L-C, Calin M, Okulov I V., Scudino S, et al. Effect of Powder Particle Shape on the Properties of In Situ Ti–TiB Composite Materials Produced by Selective Laser Melting. *J Mater Sci Technol* [Internet]. 2015 Oct;31(10):1001–5. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S100503021500136X>
  16. Ozaki T, Matsumoto H, Watanabe S, Hanada S. Beta Ti Alloys with Low Young's Modulus. *Mater Trans* [Internet]. 2004;45(8):2776–9. Available from: [https://www.jstage.jst.go.jp/article/matertrans/45/8/45\\_8\\_2776/\\_article](https://www.jstage.jst.go.jp/article/matertrans/45/8/45_8_2776/_article)
  17. Schindelin J, Arganda-Carreras I, Frise E, Kaynig V, Longair M, Pietzsch T, et al. Fiji: an open-source platform for biological-image analysis. *Nat Methods* [Internet]. 2012 Jul 1;9(7):676–82. Available from: <http://www.nature.com/articles/nmeth.2019>
  18. ASTM International. ASTM B962-17, Standard Test Methods for Density of Compacted or Sintered Powder Metallurgy (PM) Products Using Archimedes' Principle [Internet]. 2017. Available from: <http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?B962>
  19. Chalmers B. Principles of Solidification. In: *Applied Solid State Physics* [Internet]. Boston, MA: Springer US; 1970. p. 161–70. Available from: [http://link.springer.com/10.1007/978-1-4684-1854-5\\_5](http://link.springer.com/10.1007/978-1-4684-1854-5_5)