



39° SENAFOR

23ª Conferência Internacional de Forjamento - Brasil

22ª Conferência Nacional de Conformação de Chapas / 9ª Conferência Internacional de Conformação de Chapas / 6º Congresso do BrDDR

9ª Conferência Internacional de Materiais e Processos para Energias Renováveis

2ª Conferência Internacional em Engenharia de Superfícies na Conformação de Materiais

1

Análise de amostras da liga de titânio Ti6Al4V impressas por FSL para ensaios de microfresamento

Maria Clara Coimbra Gonçalves ⁽¹⁾

Marcello Vertamatti Mergulhão ⁽²⁾

Rodrigo Lima Stoeterau ⁽³⁾

Gilmar Ferreira Batalha ⁽⁴⁾

Maurício David Martins Neves ⁽⁵⁾

RESUMO

A fabricação de peças metálicas via **impressão 3D** tem ganhado destaque pela sua eficácia na manufatura de geometrias complexas e com pouco consumo de material. **Uma das estratégias de sinterização utilizadas para impressão 3D é a Fusão Seletiva a Laser (FSL)**, que consiste na completa fusão dos pós metálicos por meio de um feixe laser. As peças obtidas por esse processo apresentam uma superfície com ondulações periódicas e anisotropias relacionadas à direção da **sinterização**. No entanto, o efeito dessa ondulação e da anisotropia das peças nas suas propriedades mecânicas e na sua usinabilidade é pouco conhecido. Visto isso, este trabalho visa examinar amostras da liga de titânio Ti6Al4V impressas por FSL, mediante análises de dureza, rugosidade e por microscópio óptico para ensaios de microfresamento.

Palavras-chave — microfresamento, impressão 3D, FSL, manufatura híbrida, liga de titânio.

Selective Laser Melting printed Ti6Al4V Titanium Alloy samples analysis for Micro Milling tests

ABSTRACT

The manufacturing of metal parts via 3D printing has gained prominence for its effectiveness in manufacturing complex geometries with low material consumption. One of the sintering strategies used for 3D printing is Selective Laser Melting (SLM), which consists in the complete fusion of metal powders by means of a laser beam. The parts obtained by this process have a surface with periodic undulations and anisotropies related to the direction of sintering. However, the effect of this undulation and anisotropy of parts on their mechanical properties and machinability is poorly known. Thereby, this paper aims to examine SLM-printed Ti6Al4V titanium alloy samples, through hardness, roughness and optical microscope analysis for micro-milling tests.

Key words — micromilling, 3D printing, SLM, hybrid manufacturing, titanium alloy.

⁽¹⁾ Mestranda em Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo, mclara.coimbra@usp.br

⁽²⁾ Doutorando IPEN, Universidade de São Paulo, marcellovertamatti@usp.br

⁽³⁾ Prof. Dr.; Universidade de São Paulo, rodrigo.stoeterau@usp.br

⁽⁴⁾ Prof. Dr.; Universidade de São Paulo, gfbatalh@usp.br

⁽⁵⁾ Pesquisador e professor de Soldagem, IPEN-CNEN/SP-USP mdneves@ipen.br

1. INTRODUÇÃO

O processo de Fusão Seletiva a Laser (FSL) ou do inglês *Selective Laser Melting* (SLM) é um processo que consiste na fabricação de peças camada a camada, por meio da fusão de pós metálicos esféricos (Marques *et al.*, 2015). Essa fusão ocorre através de um feixe de laser, que é responsável por fornecer a energia térmica necessária para a consolidação do objeto de camada a camada, conforme a Figura 1. O processo é composto por diversos parâmetros, sendo os principais: potência e tipo do laser, comprimento de onda, velocidade de varredura, atmosfera protetora, temperatura ambiente, tipo e volume de gás e porcentagem de O₂ (Bremen *et al.*, 2012; Grzesiak and Krawczyk, 2015; Meier and Haberland, 2008; Gu *et al.*, 2012).

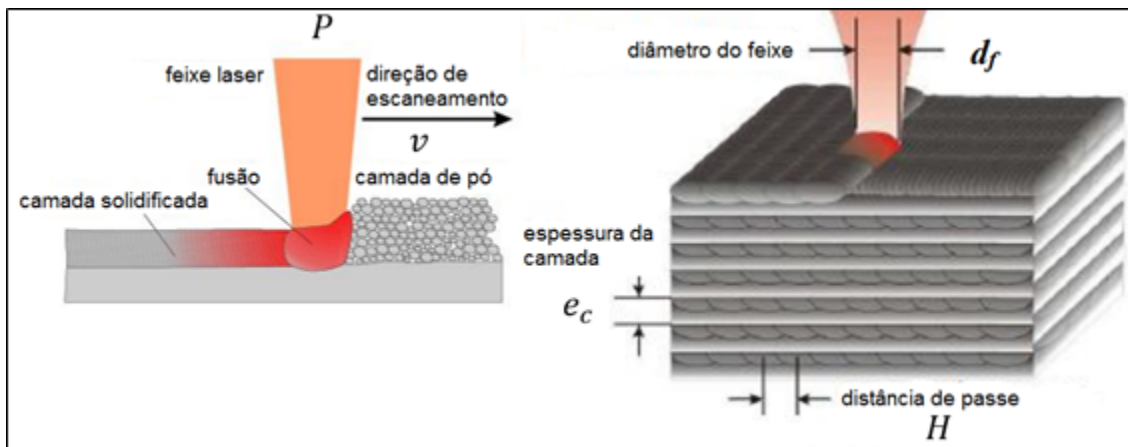


Figure 1: Esquema do processo de consolidação da técnica SLM, em a) representação da fusão do pó metálico pela ação do feixe laser e b) algumas variáveis de consolidação.

Fonte: Adaptado de Gu *et al* (2012).

Esse processo viabiliza a produção de peças de titânio, leves e com topologia otimizada, pois apresenta vantagens como o melhor aproveitamento de matéria-prima e a produção near net shape de componentes (Uhlmann *et al.*, 2015; Chen *et al.*, 2017). Porém, as peças provenientes desse processo possuem uma rugosidade cinemática mais elevada, baixa exatidão dimensional e elevadas tensões residuais trativas. Como consequência existe a necessidade de operações de pós-processo, principalmente quando se visa melhoria nas exatidões dimensionais e de forma, além de melhor acabamento. Essa integração de usinagem e FSL cria uma rota de fabricação híbrida que visa superar as limitações geradas no processo de impressão 3D.

As amostras provenientes do processo de impressão por FSL, como resultado do processo de fusão e solidificação rápida, gera uma anisotropia dependente das direções de construção das amostras. Onde a direção de impressão influencia diretamente em suas propriedades mecânicas, tensões residuais, rugosidade e microestrutura.

Portanto, este trabalho tem por objetivo analisar amostras fabricadas por FSL, que foram submetidas a ensaios de microfresamento. Foram realizadas análises de rugosidade, testes de tração, análises no microscópio óptico e ensaios de microfresamento a fim de verificar a influência da direção de impressão e das anisotropias das amostras nos resultados obtidos. Para isso, amostras foram impressas conforme ilustrado na Figura 2. A liga de titânio Ti6Al4V foi o material selecionado por ser muito utilizado para a fabricação de uma gama de componentes para as indústrias médica, aeroespacial e aeronáutica, devido a sua elevada resistência à corrosão, excelente resistência mecânica, baixa densidade e elevada biocompatibilidade (Baldo, 2013). As amostras foram submetidas a ensaios de microfresamento em duas direções distintas (planos ZX e ZY da Figura 2).

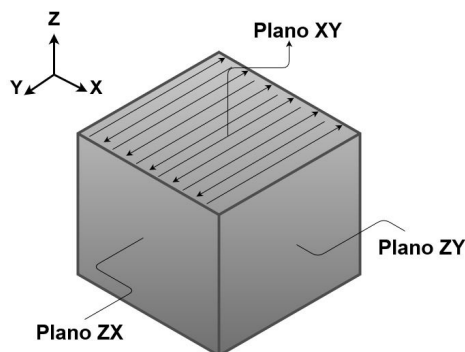


Figure 2: Direções do escaneamento do laser e divisão dos planos das amostras impressas por SLM. Adaptado de: Chen *et al.* (2017).

2. PROCESSO DE FUSÃO SELETIVA A LASER

Os corpos de prova foram fabricados utilizando um pó atomizado, de geometria esférica e com composição química conforme abordado na norma ASTM F3001-14 (Tabela 1).

Tabela 1: Composição química do material de partida (porcentagem máxima em peso) para liga de Ti6Al4V. Fonte: ASTM F3001-14.

Ti	Al	V	Fe	O ₂	N ₂	H ₂	C	Y
Balanço	6,50	4,5	<0,25	<0,13	0,05	0,012	0,08	0,005

A distribuição granulométrica do pó para a fabricação dos corpos de prova, foi realizada por um equipamento de medida de tamanho de partícula CILAS. As medidas de escoabilidade, densidade aparente e densidade batida foram analisadas com base nos procedimentos descritos na norma de manufatura aditiva ASTM F3049-14. O formato e morfologia das partículas foram avaliados por microscopia eletrônica de varredura.

As amostras foram fabricadas utilizando uma impressora Laser Ominitek modelo OmniSint-160 (Figura 3).



Figure 3: Equipamento OminiSint-160 de fusão seletiva a laser da empresa Ominitek.

As amostras foram fabricadas em tamanhos padronizados e nas direções YX e XY, conforme esquema observado na Figura 4, para observar o efeito da anisotropia do processo SLM nos ensaios realizados.

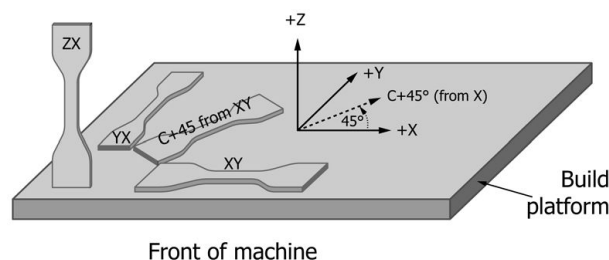


Figure 4: Representação da orientação de fabricação das amostras via SLM. Fonte: ASTM F2971.

3. CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS

Os resultados mínimos requeridos pelas normas vigentes de manufatura aditiva para a liga de Ti6Al4V, podem ser observados na Tabela 3 (ASTM F3302-18). As propriedades do material impresso foram comprovadas através de ensaios de tração realizados anteriormente, cumprindo com os valores requeridos na norma ASTM F3302-18.

Tabela 3: Propriedades mecânicas mínimas requeridas para a liga de Ti6Al4V manufaturada via fusão em leito de pó. Fonte: ASTM F3302-18.

Liga	Condição	Tensão máxima (MPa)	Tensão de escoamento a 0,2% offset (MPa)	Alongamento (%)	Redução de área (%)
Ti6Al4V	AT	895	825	10	15
Ti6Al4V ELI	R HIP	860	795	10	25

Nota: AT – Alívio de Tensão, R – Recozimento, HIP – Pressão Isostática à Quente

Antes de realizar o microfresamento das amostras obtidas por *SLM*, os seus valores de dureza Vickers foram mensurados. Para isso, com auxílio de um durômetro, cada uma das três amostras foram submetidas a uma carga de 30kgf por quinze segundos. O procedimento foi repetido por três vezes em cada amostra e os valores médios obtidos para cada uma estão dispostos na Tabela 4.

Tabela 4: Resultados de dureza obtidos.

Amostra	Dureza média em HV30	Dureza média em HRC
1	370,1	37,7
2	367,5	37,4
3	364,4	37,1

Os valores de dureza se encontram dentro da faixa encontrada na literatura para a liga Ti6Al4V, que varia de 30-41HRC (Jaffery *et al.*, 2015). Pode-se notar também uma pequena variação entre as médias dos valores de dureza de diferentes amostras, que pode ser atribuído aos erros de medições associados.

Similarmente, antes dos ensaios, os parâmetros de rugosidade em 2D e 3D das amostras foram mensurados por interferometria óptica, utilizando um perfilômetro 3D CCI da Taylor Hobson. Cada amostra teve os valores de rugosidade mensurados três vezes em pontos aleatórios. A média dos resultados dessas três medições podem ser vistos na Tabela 5, para os parâmetros 2D e na Tabela 6, para os parâmetros 3D, cujas medições foram realizadas numa área de varredura de

1,71x1,71 mm e por meio da análise de 512 perfis. Para um dos pontos das amostras 1, 2 e 3, os perfis em 2D e 3D podem ser visualizados nas Figuras 5 e 6, respectivamente.

Tabela 5: Parâmetros de rugosidade 2D obtidos para as três amostras.

Amostra	Parâmetros						
	Ra (μm)	Rq (μm)	Rp (μm)	Rv (μm)	Rz (μm)	Rsk	Rku
1	1,83	2,28	4,79	4,51	12,80	0,003	2,94
2	1,88	2,34	4,63	4,51	12,66	0,039	2,95
3	1,95	2,37	4,52	4,36	13,32	0,123	2,79

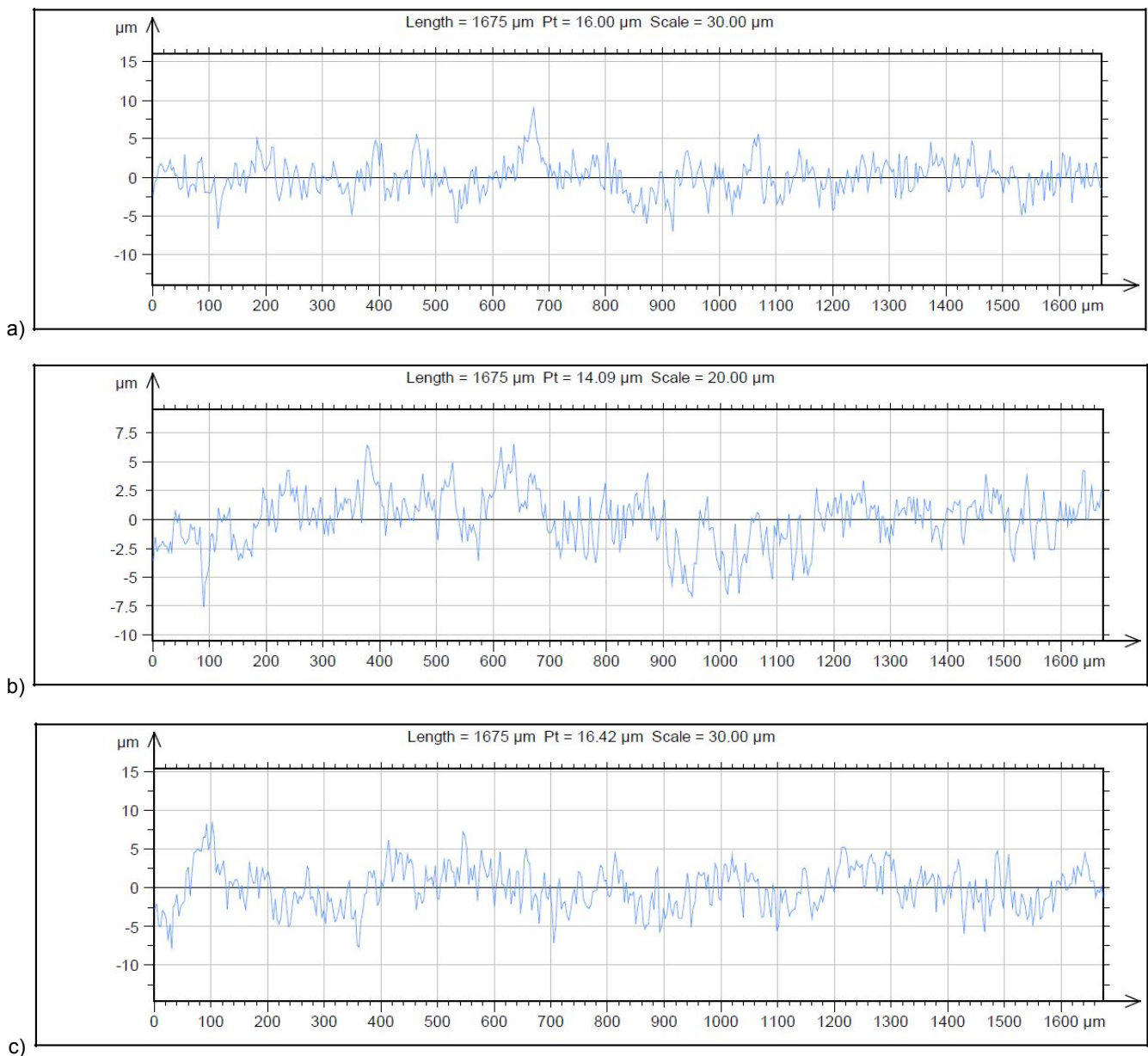
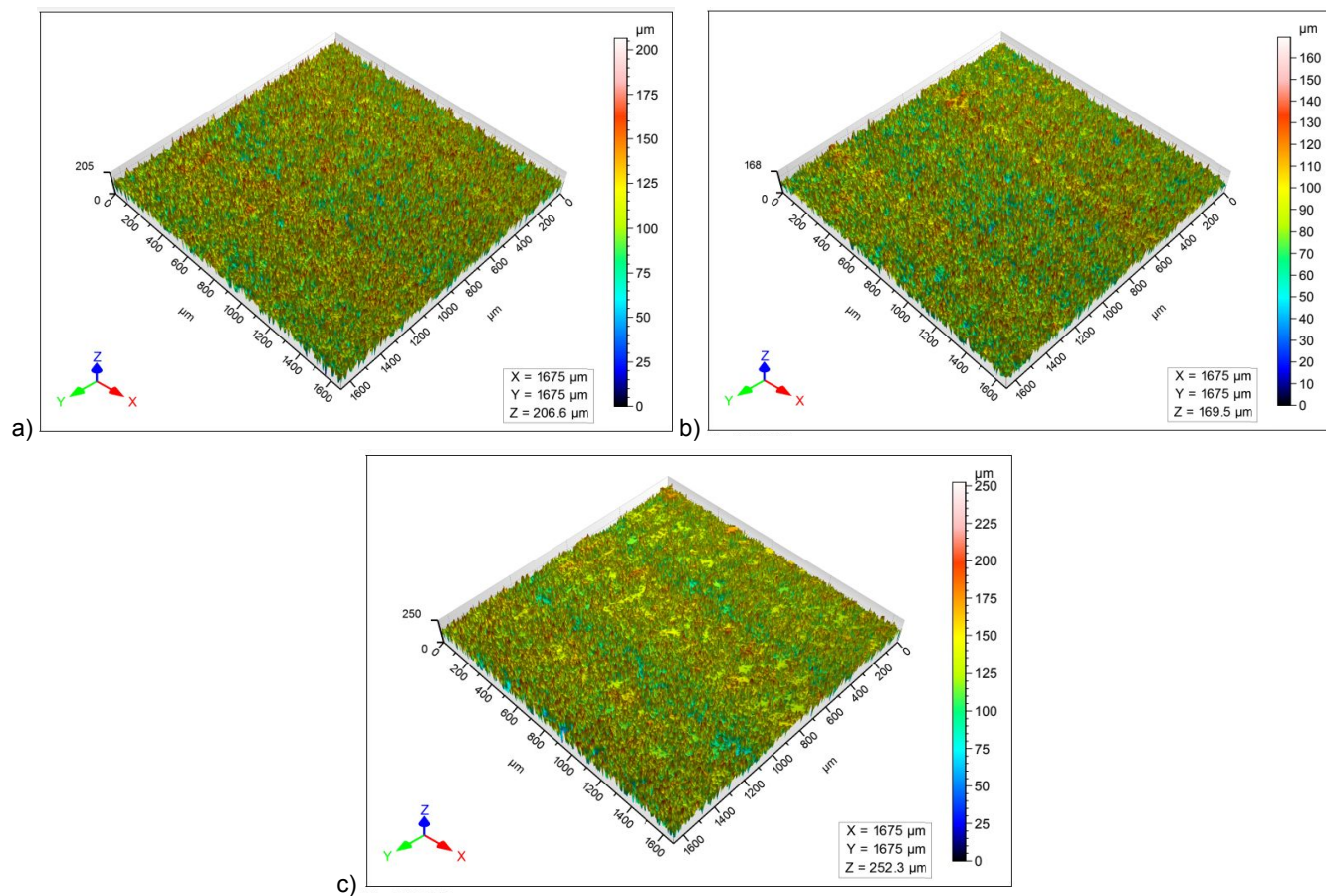


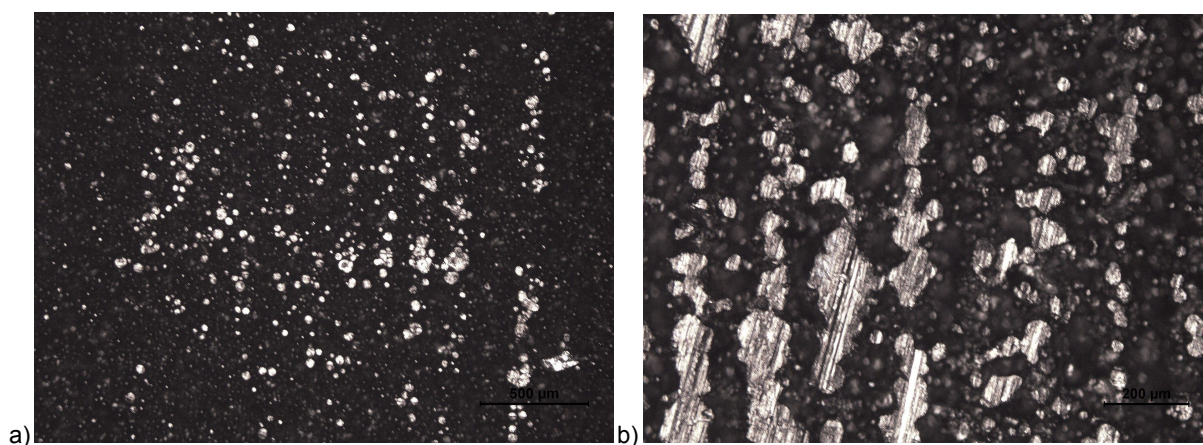
Figure 5: Perfil 2D de rugosidade para: a) Amostra 1, b) Amostra 2 e c) Amostra 3

Tabela 6: Parâmetros de rugosidade 3D obtidos para as três amostras.

Amostra	Parâmetros						
	Sa (μm)	Sq (μm)	Sp (μm)	Sv (μm)	Sz (μm)	Ssk	Sku
1	22,42	28,02	98,77	99,65	198,43	0,067	2,76
2	20,72	25,97	96,25	92,14	188,40	0,075	2,82
3	22,93	29,65	115,33	114,3	229,6	-0,075	3,19

**Figure 6:** Perfil 3D de rugosidade para: a) Amostra 1, b) Amostra 2 e c) Amostra 3

Além disso, as amostras foram analisadas no microscópio óptico, conforme Figura 7.

**Figure 7:** Micrografia das amostras pelo microscópio óptico com aumento de a) 50x e b) 100x.

É possível notar a orientação de impressão da amostra pelo perfil 3D, pela micrografia das amostras e também a olho nu. Os valores de rugosidade também se diferem quando mensurados em direções diferentes, o que é justificado devido a anisotropia da amostra. Além disso, com os valores de Ra obtidos, a rugosidade das amostras se enquadram na classe de rugosidade N7, segundo a norma NBR 8404/84.

4. MICROFRESAMENTO DE TITÂNIO

Nos ensaios de microfresamento, foram analisadas a influência da espessura da camada nas forças de corte, desgaste da ferramenta e rugosidade das amostras impressas por FSL. Para definição dos parâmetros do processo (avanço, velocidade e profundidade), trabalhos com ligas de Ti6Al4V provenientes de processos convencionais foram tomados como base. Aslantas *et al.* (2018) buscaram otimizar os parâmetros de corte no microfresamento da liga Ti6Al4V, focando na redução da rugosidade e formação de rebarbas. Segundo os autores, os melhores resultados foram obtidos com a velocidade de 20000RPM, avanço de 0,25 μ m/dente e profundidade de 0,05mm. Attanasio *et al.* (2013) analisaram o efeito da microestrutura da liga Ti6Al4V no seu microfresamento. Para isso, eles utilizaram uma velocidade de 25000RPM e profundidade de corte de 0,05mm para fresar um canal de 12mm. O diâmetro da microfresa utilizada foi de 200 μ m e os avanços foram de 0,5 e 1,5 μ m/dente. Por outro lado, Liang *et al.* (2018) estudaram a influência de diferentes revestimentos das fresas na usinagem da liga Ti6Al4V. Para a usinagem a seco, eles utilizaram um avanço de 2 μ m/dente, profundidade de 0,05mm e velocidade de 20m/min.

Visto isso, para os ensaios de microfresamento das amostras impressas por SLM, foram adotados os valores de 5000 e 7500 RPM, que está dentro da capacidade da CNC utilizada, um avanço de 1,5 μ m/dente e profundidade de 0,05mm, ambos mantidos constantes. Logo, os ensaios foram organizados seguindo o planejamento fatorial apresentado na Tabela 7, onde o diâmetro das microfresas utilizadas, a velocidade e a direção de impressão da amostra foram variados em dois níveis.

Tabela 7: Parâmetros dos ensaios de microfresamento

Profundidade = 0.05mm Avanço = 1.5 μ m/dente			
Ensaio	Velocidade (rpm)	Direção (°)	Diâmetro (mm)
1	5000	0	0.5
2			0.8
3		90	0.5
4			0.8
5	7500	0	0.5
6			0.8
7		90	0.5
8			0.8

As microfresas utilizadas são de topo reto, com diâmetros de 0,5 e 0,8mm e feitas de carboneto de tungstênio, com revestimento de TiAlN e ângulo de saída de 35°.

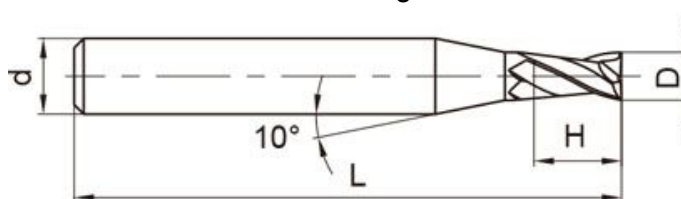


Figure 8: Geometria das fresas utilizadas, onde L=50mm; d=4mm; D₁=0,5mm, D₂=0,8mm e H=2D.
Fonte: Catálogo Rewiid (2019).

A fim de checar a integridade superficial das microfresas antes dos ensaios, foram feitas análises no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV). A composição das ferramentas foi confirmada por Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS) (Figura 8), as e suas dimensões integridade e dimensões foram analisados através de imagens de elétrons secundários. Na Figura 9 pode-se visualizar as imagens obtidas para uma fresa de cada diâmetro utilizado.

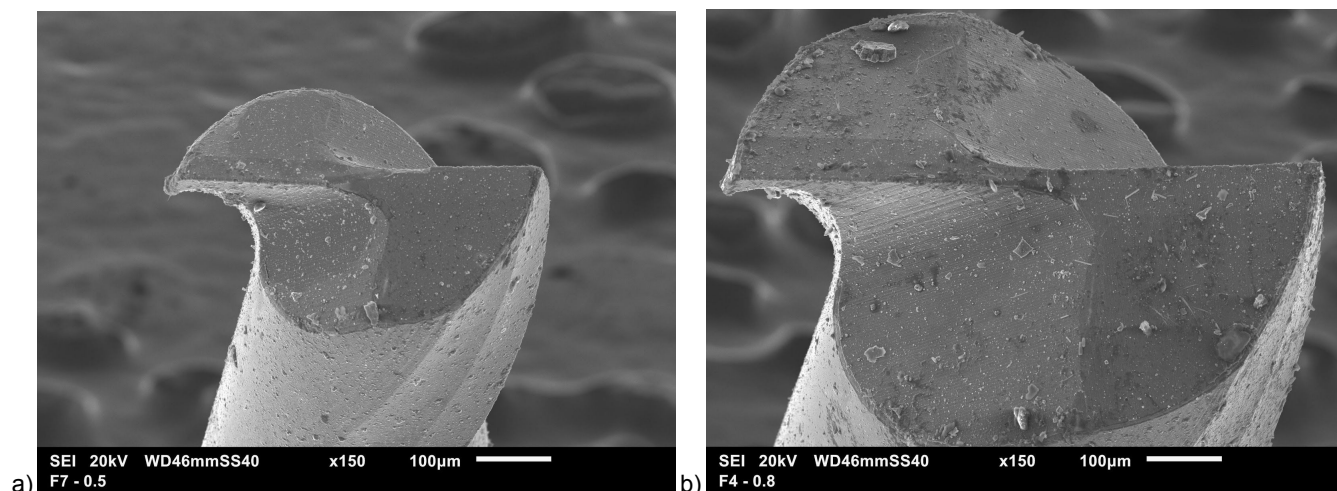


Figure 8: a) Imagem por elétrons secundários das fresas de a) 0,5mm e b) 0,8mm (aumento de 150x)

Os ensaios foram realizados através do fresamento frontal de um rasgo de 12mm. As dimensões dos canais podem ser vistas na Figura 9 e cada ensaio da Tabela 7 será repetido duas vezes. O avanço utilizado foi de 0,25µm/dente.

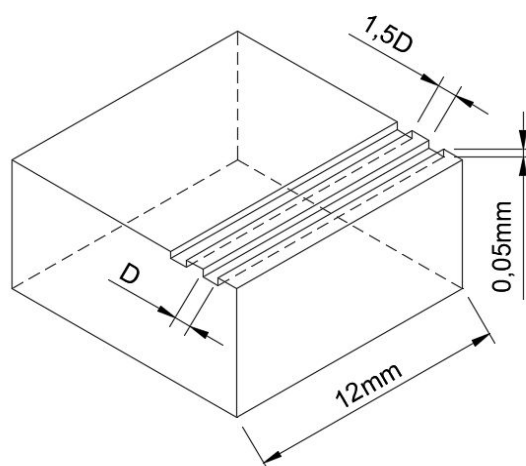


Figure 9: Ilustração da disposição dos canais na peça.

5. CONCLUSÕES

Com as análise das amostras pode-se concluir que os valores de dureza e rugosidade das amostras estão dentro da faixa esperada. Para os ensaios de tração, as propriedades mecânicas de tensão máxima e de escoamento das amostras cumprem com os valores requeridos na norma ASTM F3302-18 .

Em relação aos ensaios de microfresamento, espera-se que seja possível analisar a influência da anisotropia do material impresso por FSL e quais são os fatores mais influentes nos resultados obtidos. Para isso, serão mensuradas as forças de corte, desgaste da ferramenta e rugosidade das amostras após o microfresamento. A porosidade e microestrutura das amostras serão analisadas após os ensaios, visto que esses processos requerem ataque e polimento das amostras. Também

pretende-se fazer uma análise da qualidade dos canais, formação de rebarbas e cavacos. O objetivo final é confirmar se rota híbrida de usinagem por microfresamento após SLM é um processo viável e que gera melhorias consideráveis na qualidade do produto final.

Futuramente, será realizada uma análise completa dos resultados das micrografias, rugosidade, desgaste das ferramentas, rebarbas e dureza obtidos após o processo de fresamento.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o suporte financeiro fornecido pelo CNPq, a FAPESP e a Omnitek.

REFERÊNCIAS

- [1] MARQUES, S; SOUZA, A.F; SANTOS, E.C. Fusão seletiva a laser para fabricação de peças metálicas com geometrias complexas. SETIS- III Seminário de Tecnologia Inovação e Sustentabilidade, 2014.
- [2] BREMEN, S. et al. Selective Laser Melting. *Laser Tech J.* 9 (2), 33–38, 2012.
- [3] GRZESIAK, D; KRAWCZYK M. Effects of the Selective Laser Melting Process Parameters on the Functional Properties of the Co-Cr Alloy. *Int J Recent Contrib from Eng Sci IT* 3 (1), 39–42, 2015.
- [4] MEIER, H; HABERLAND, C. Experimental studies on selective laser melting of metallic parts. *Materwiss Werksttech* 39 (9), 665–670, 2008
- [5] GU D.D; et al. Laser additive manufacturing of metallic components: materials, processes and mechanisms. *Int Mater Rev* 57(3), 133–164, 2012.
- [6] UHLMANN, E; et al. Additive manufacturing of titanium alloy for aircraft components. 15th Machining Innovations Conference for Aerospace Industry, 2015.
- [7] CHEN, L.Y; et al. Anisotropic response of Ti-6Al-4V alloy fabricated by 3D printing selective laser melting. *Materials Science and Engineering*, 2017, 389-395.
- [8] BALDO, D. Estudo do microfresamento da liga de titânio Ti-6Al-4V utilizando análise de sinais de força e emissão acústica. Dissertação, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de São João Del-Rei, 2013.
- [9] ASTM F3001-14, Standard Specification for Additive Manufacturing Titanium-6 Aluminum-4 Vanadium ELI (Extra Low Interstitial) with Powder Bed Fusion, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014, www.astm.org.
- [10] ASTM F3049-14, Standard Guide for Characterizing Properties of Metal Powders Used for Additive Manufacturing Processes, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014, www.astm.org.
- [11] ASTM F2971-13, Standard Practice for Reporting Data for Test Specimens Prepared by Additive Manufacturing, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013, www.astm.org.
- [12] ISO 25178-2:2012: Geometric Product Specification (GPS). Surface Texture: Areal. Part 2: Terms, Definitions and Surface Texture Parameters, Geneva: Int. Org. Stand., 2012.
- [13] ISO 4287:1997: Geometric Product Specification (GPS). Surface Texture Profile Method: Terms, Definition and Surface Texture Parameters, Geneva: Int. Org. Stand., 1997.
- [14] SEIKA, A.G; KOWALSKI, G. Influência da rugosidade sobre a adesão do revestimento em aços rápidos M2 com tratamento duplex. Curso de Engenharia Mecânica, UTFPR, 2014.
- [15] ASLANTAS, K; EKICI, E; ÇIÇEK, A. Optimization of process parameters for micro milling of Ti-6Al-4V alloy using Taguchi-based gray relational analysis. *Measurement*, 2018.
- [16] ATTANASIO, A. et al. Influence of Material Microstructures in Micromilling of Ti6Al4V Alloy. *Materials*, 2013, 6, 4268-4283.
- [17] LIANG, Z; et al. Cutting Performance of Different Coated Micro End Mills in Machining of Ti-6Al-4V. *Micromachines*, 2018, 9, 568.
- [18] ASTM F3302-18, Standard for Additive Manufacturing – Finished Part Properties – Standard Specification for Titanium Alloys via Powder Bed Fusion, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018, www.astm.org.
- [19] JAFFERY S; et al. Statistical analysis of process parameters in micromachining of Ti-6Al-4V alloy. *Journal of Engineering Manufacture*, 2015, p. 118.
- [20] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8404/84: Indicação do estado de superfícies em desenhos técnicos - Procedimento. 1984.