

RUGOSIDADE DE AMOSTRAS DE Ti-6Al-4V PRODUZIDAS POR DEPOSIÇÃO DE ENERGIA DIRECIONADA E PÓS-PROCESSADAS POR MICROFRESAMENTO

Willian Roberto Valicelli Sanitá

Geovana Eloizi Ribeiro

Vincent Edward Wong Diaz

Tiago Monteiro Camponucci

Alessandro Roger Rodrigues

Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, Av. Trabalhador São-Carlense, 400, 13.566-590, São Carlos, SP
willian.r.sanita@usp.br, geovana_rib@usp.br, ywong.ufs@gmail.com, tiago.camponucci@usp.br, roger@sc.usp.br,

Resumo: Os componentes metálicos fabricados pelo processo de manufatura aditiva possuem microestruturas diferentes das formas convencionais no mesmo material e, como consequência, as propriedades mecânicas e usinabilidade das peças produzidas usando essas tecnologias diferem. Além disso, as microestruturas desses processos são muitas vezes anisotrópicas e, como tais, diferentes regiões possuem propriedades físicas e mecânicas variadas e, portanto, resposta variável durante a usinagem pós-processo. A área de implantes metálicos tem-se valido da manufatura aditiva e de processos de usinagem, pois a primeira permite obter peças de geometrias complexas e individualizadas e a segunda proporciona a algumas regiões funcionais da peça melhores acabamentos e tolerâncias dimensionais e geométricas. Isto posto, este artigo avaliou a rugosidade de amostras da liga Ti-6Al-4V, utilizadas em implantes, obtidas pelo processo de manufatura aditiva Direct Energy Deposition (DED) e pós-processadas por microfresamento de topo reto. Os parâmetros de processo da manufatura aditiva foram mantidos constantes, enquanto o avanço por aresta no microfresamento variou em dois níveis (12 e 24 $\mu\text{m/z}$). Os resultados mostraram que ambas as amostras impressas e microusinadas produziram superfícies com ausência de material (Skewness maior que zero) e com picos e vales localizados e pontiagudos (Kurtosis maior que 3). A rugosidade média aritmética planar S_a atingiu cerca de 100 μm para a amostra impressa, ao passo que o microfresamento gerou S_a em torno de 3 μm , alcançando uma redução significativa de, aproximadamente, 97%. O mesmo comportamento ocorreu para a rugosidade máxima S_z , com um aprimoramento do acabamento em torno de 80%. Diferenças foram observadas entre medidas de rugosidade de área e perfil decorrentes, provavelmente, da escolha das áreas de medição nas amostras ou de eventuais defeitos nas superfícies não identificados durante o processo de avaliação da rugosidade. Estes resultados demonstram que a manufatura aditiva produz superfícies mais rugosas e, dependendo da aplicação das peças, há necessidade de um pós-processo para melhoria do acabamento, da geometria e das dimensões finais.

Palavras-chave: Manufatura Aditiva; LP-DED; Titânio; Microfresamento; Rugosidade.

1. INTRODUÇÃO

A tecnologia de Deposição de Energia Direcionada usando Laser (L-DED) desempenha um papel importante no setor industrial devido à sua capacidade de complementar o desenvolvimento da manufatura subtrativa tradicional, oferecendo peças com precisão relativamente alta, fabricando peças de grande porte e alta complexidade geométrica, reduzindo custo e tempo de fabricação (Armstrong; Mehrabi; Naveed, 2022). Uma das contribuições desta tecnologia na indústria tem sido a criação de produtos customizados sem montagem, diminuindo o número de componentes e produzindo componentes mais leves e mais baratos (Dezaki *et al.*, 2022).

Apesar das vantagens oferecidas no processo L-DED, ainda existem desafios relacionados à textura da superfície e às propriedades mecânicas das peças produzidas. Desta maneira, faz-se necessário introduzir técnicas de pós-processamento, tais como técnicas subtrativas, tratamentos térmicos e reações químicas quando é necessária alta precisão (Kumbhar; Mulay 2018). Em aplicações médicas, especificamente na produção de implantes médicos e próteses, o uso da tecnologia L-DED e microusinagem são obrigatórias devido à sua necessidade de oferecer componentes com alta qualidade, incluindo a rugosidade que é fundamental para garantir a adesão celular e a osseointegração (Alves; Wassal, 2009).

A liga Ti-6Al-4V ELI grau 23 é utilizada na área médica para o desenvolvimento de implantes ortopédicos, implantes dentários e instrumentos cirúrgicos (Kulkarni *et al.*, 2015; Hanawa, 2019). As propriedades que esta liga possui são alta resistência mecânica, à corrosão e à fadiga, bem como elevada biocompatibilidade e ductilidade. Uma das implicações de se fabricar ligas de titânio mediante o processo L-DED é o uso de uma atmosfera inerte, devido à sua alta reatividade com oxigênio e nitrogênio a elevada temperatura, originando peças que podem oxidar e formar camadas de óxido e nitreto

na superfície, assim como trincas ou outros defeitos que podem afetar as propriedades mecânicas da peça (Lim *et al.*, 2021).

A combinação da tecnologia L-DED com técnicas subtrativas de ligas de Ti-6Al-4V para aplicação médica possui uma boa fonte de informação em relação aos problemas explorados neste estudo.

Oyelola *et al.* (2016) analisaram as implicações da usinagem de peças produzidas por L-DED na integridade superficial da peça. Nesta abordagem um cilindro produzido por L-DED a base de arame foi analisada em termos de rugosidade, dureza e formação de cavaco no processo de torneamento. Na pesquisa, Oyelola *et al.* (2016) sustentam a dependência existente entre os parâmetros de processo e a combinação peça-ferramenta com a rugosidade, obtendo valores que oscilam entre 2,140 μm e 0,822 μm no torneamento de peças produzidas por LP-DED com pastilha com e sem revestimento.

Outro estudo desenvolvido por Bonaiti *et al.* (2017) aborda a usinabilidade do microfresamento de peças de Ti-6Al-4V produzidas por L-DED usando matéria-prima em forma de pó. A abordagem incluiu a fabricação de três corpos cúbicos de Ti-6Al-4V e a utilização de um cubo de Ti-6Al-4V padrão para comparação dos resultados em termos de micrografia, dureza e porosidade. Foi possível observar um incremento da dureza da peça com o aumento da potência do laser. O aumento da dureza nas amostras gerou regiões com martensita mais fina e uma diminuição da porosidade, melhorando a integridade das amostras. Por outro lado, foi observada a diminuição das forças de corte quando peças produzidas por *Laser Powder Directed Energy Deposition* (LP-DED) foram usinadas em comparação com o cubo padrão, mostrando que as forças aumentam com o aumento do avanço e da profundidade de usinagem.

Oyelola *et al.* (2018) estudaram a usinabilidade de peças produzidas por LP-DED. Um dos destaques observados neste estudo foi a utilização de processos de tratamento térmico por recozimento para modificar a microestrutura da peça. O tratamento térmico desses componentes reduziu a dureza do material e, conseqüentemente, as forças de corte na usinagem em até 40% em baixa velocidade de corte. Por outro lado, o tratamento térmico contribuiu para a homogeneização da microestrutura, reduzindo a força de corte média durante a usinagem.

Ribeiro *et al.* (2023) estudaram a influência da morfologia do pó e a potência do laser na rugosidade de peças produzidas por L-DED usando pó. A pesquisa sustenta que a morfologia, o tamanho da partícula e a distribuição de partículas, combinados com o aumento da potência do laser, estão diretamente correlacionados com a qualidade superficial da peça. A interação interpartículas durante o processo de deposição de pó com flocos e a distribuição de pó não gaussiana geraram uma superfície mais lisa quando comparada com pó homogêneo devido às interações entre partículas existentes durante o processo de deposição.

Embora existam na literatura experimentos envolvendo a combinação do processo L-DED com técnicas subtrativas tradicionais, ainda não foram suficientemente exploradas a fabricação de peças produzidas por L-DED a base de pó com o processo de microusinagem.

Baseado nisso, o objetivo deste estudo consiste em caracterizar a topografia da superfície de peças produzidas por LP-DED da liga Ti-6Al-4V grau 23 e pós-processadas por microfresamento de topo reto, analisando-se os parâmetros de rugosidade média e máxima 2D Ra e Rz, 3D Sa e Sz, e estatísticos 3D *Skewness* Ssk e *Kurtosis* Sku.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Ti-6Al-4V grau 23 produzido pela Carpenter Additive® foi utilizado para a deposição das amostras. A sua composição química é apresentada na Tab. 1, contendo tamanho de partícula de 45 a 106 μm . A amostra foi fabricada em uma máquina DED de 5 eixos BeAM Machine, Modulo 250 com laser Nd:YAG contínuo. Um prisma de 15 mm x 15 mm x 6 mm foi produzido utilizando potência de 300 W, velocidade de avanço de 2000 mm/min e vazão de pó de 5,4 g/min.

No processo de microusinagem as superfícies dos cubos foram inicialmente uniformizadas com uma fresa de $\varnothing$ 3 mm. Os ensaios de microfresamento foram conduzidos sobre as superfícies uniformizadas, considerando velocidade de corte $v_c = 24$ m/min, profundidade de usinagem $a_p = 30$ μm , penetração de trabalho $a_e = 300$ μm , percurso de avanço $L_f = 12$ mm, avanço por aresta $f_z = 12$ e 24 $\mu\text{m}/\text{z}$, corte concordante e microfresa de topo reto Mitsubishi MS2MSD0050 de duas arestas de corte e diâmetro $d_f = 500$ μm , sem aplicação de fluido lubrificarrefrigerante. No total, foram usinados seis canais lineares com corte em cheio de abertura (não considerado para análise de rugosidade) em cada canal, sendo três canais para o menor avanço e outros três para o maior avanço da ferramenta. Em cada um dos seis canais, foram executados três passes paralelos com $a_e = 300$ μm como réplicas para a medição das rugosidades. A Figura 1 ilustra a amostra microfresada com as dimensões e as estratégias de usinagem. Uma ferramenta nova para cada condição de usinagem foi empregada para evitar a influência do desgaste da ferramenta na rugosidade das peças microfresas.

Tabela 1. Composição química da liga Ti-6Al-4V utilizada (Carpenter Additive®)

Al	C	H	Fe	N	O	Ti	V	Y
5,5 - 6,5	0 - 0,8	0 - 0,01	0 - 0,25	0 - 0,03	0 - 0,13	Balanço	3,5 - 4,5	0 - 0,05

A rugosidade foi avaliada utilizando o microscópio laser confocal 3D sem contato Lext Olympus OLS 4100 antes e depois do processo de microfresamento. Os parâmetros de rugosidade 2D (perfil) de amplitude foram R_a (média aritmética) e R_z (média de 5 valores pico-vale). Os parâmetros de rugosidade 3D (área) de amplitude adotados foram S_a (média aritmética) e S_z (média de 5 valores pico-vale) e estatísticos de 3ª ordem S_{sk} (*Skewness*) e 4ª ordem S_{ku} (*Kurtosis*).

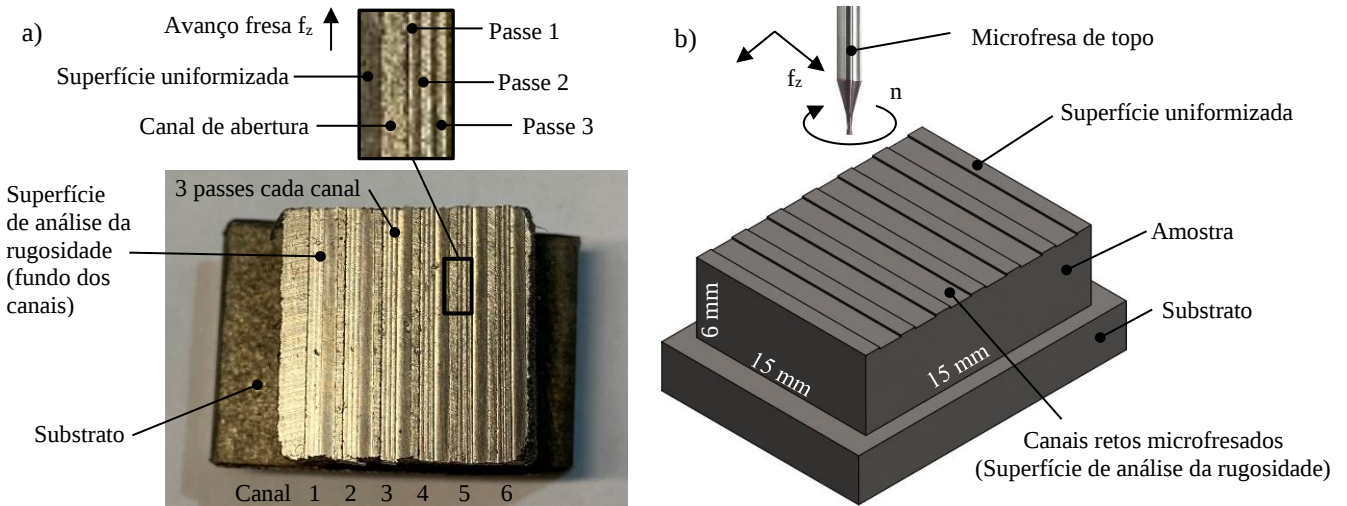


Figura 1. Amostra microfresada: (a) vista superior real mostrando os canais e passes usinados; (b) desenho esquemático em perspectiva isométrica contendo as dimensões principais e as estratégias de usinagem

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O procedimento experimental antes descrito mostrou a importância da combinação entre a morfologia do pó e os parâmetros de processos para a qualidade superficial das peças obtidas pelo processo LP-DED e, conseqüentemente, o processo de microusinagem. Na Figura 2, é possível observar usando microscopia laser confocal a superfície das amostras produzidas por LP-DED “como produzida” para análise das rugosidades 3D. Na escala de cores da Fig. 2a, é possível observar cores frias (azul e roxo) que representam vales na superfície, ao passo que cores quentes (vermelho e laranja) representam picos. Em uma área de $2,56 \text{ mm} \times 2,56 \text{ mm}$ ($6,55 \text{ mm}^2$), verifica-se na Fig. 2a que a rugosidade pico-vale atinge cerca de $871,7 \mu\text{m}$, ou seja, maior que a rugosidade típica de processos de usinagem. Na Figura 2b, observa-se uma direcionalidade da rugosidade na orientação horizontal, ora indicada pela cor azul clara ($174,3 \mu\text{m} < \text{altura} < 348,7 \mu\text{m}$), ora indicada pela cor verde ($348,7 \mu\text{m} < \text{altura} < 523,0 \mu\text{m}$). Pelas imagens não se verifica nenhum dano na superfície decorrente do processo de LP-DED, como vazios, por exemplo, exceto pelos respingos pontuais conhecidos na literatura como *balling effect* (Svetlizky *et al.*, 2021) e distribuídos na superfície da peça decorrentes da dinâmica do processo de fusão do pó de titânio e posterior resfriamento.

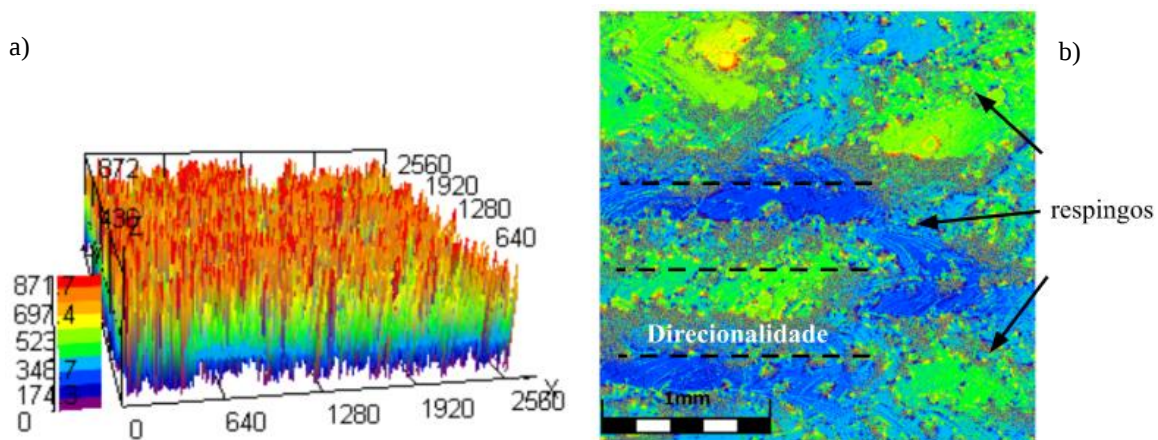


Figura 2. Topografia tridimensional (a) e superficial (b) das amostras fabricadas por LP-DED

Fazendo-se uma análise quantitativa da rugosidade das amostras sem usinagem, apresenta-se na Tab. 2 os dados de rugosidade de área ou tridimensionais medidos por microscopia confocal em 4 regiões distintas da amostra.

Tabela 2. Valores de rugosidade 3D das amostras produzidas pelo processo LP-DED

Medida	Sa [μm]	Sz [μm]	Ssk [-]	Sku [-]
1	117,50	924,20	0,66	3,65
2	92,06	776,30	0,34	3,61
3	97,07	660,20	0,38	2,53
4	97,23	753,90	0,51	3,05
Média	100,97	778,65	0,47	3,21
Desvio $\pm$	9,77	94,65	0,13	0,46
Variação %	9,68	12,16	26,49	14,29

Dos valores de rugosidade mostrados na Tab. 2, verifica-se que a rugosidade pico-vale Sz é cerca de 7,7 vezes maior que a rugosidade média aritmética Sa, o que demonstra que o processo de LP-DED é mais robusto, gerando rugosidades mais grosseiras devido ao grande aporte térmico derivado do laser e à geração da poça de fusão na superfície da peça. Em processos de fabricação que geram topografias mais controladas, a rugosidade pico-vale tende a ser, aproximadamente, 4 vezes maior que a rugosidade média.

Analisando-se os parâmetros de rugosidade estatística, pode-se afirmar que a superfície produzida por LP-DED apresenta maior predominância de picos na superfície da amostra ($Ssk > 0$) e picos ou vales pontualmente mais íngremes na superfície ($Sku > 3$). Como estes valores estão próximos de seus limites (zero e três), pode-se dizer que a superfície tende a um perfil Gaussiano ou é Normalmente distribuída, ou seja, a topografia apresenta simetria de picos e vales em relação ao plano médio da altura das asperidades, bem como a distribuição de picos ou vales é randômica.

Avaliando-se a rugosidade média e pico-vale 2D (perfil), na Fig. 3a observa-se 7 planos de medição, porém sendo considerados apenas 4 deles, orientados na direção do perfil de rugosidade gerado pelo processo de deposição. A Figura 3b mostra a direcionalidade da topografia da amostra, neste caso orientada verticalmente, que pode ser constatada pelas cotas intermediárias de altura das asperidades (azul claro e verde). Nesta Fig. 3a, é mais nítida a direcionalidade da textura superficial quando se consideram os respingos do processo de LP-DED, pois estão orientados e alinhados verticalmente. Também não se observa danos na superfície depositada.

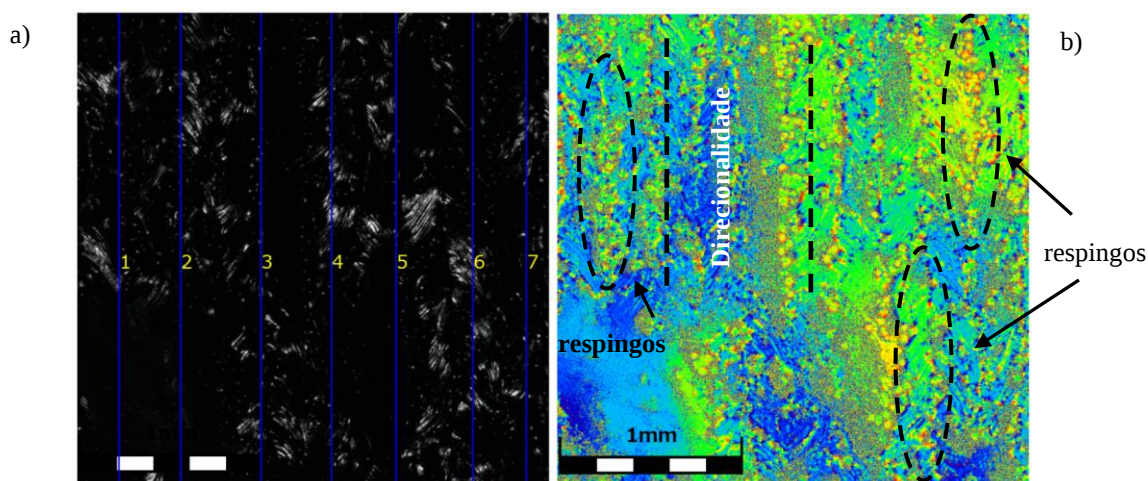


Figura 3. (a) Planos de medição (b) e topografia superficial das amostras fabricadas por LP-DED

As medidas de rugosidade 2D são apresentadas na Tab. 3. Nota-se que a razão Rz/Ra ainda permaneceu elevada nas medidas de rugosidade de perfil, alcançando o valor de 6,8, equivalente à razão Sz/Sa , que foi de 7,7. Assim, os parâmetros de rugosidade média 2D conseguem representar a topografia das amostras impressas equivalentemente ao parâmetro de área Sa. Este resultado também pode ser validado ao comparar os valores de Ra e Sa, resultando em uma diferença relativa de apenas 1,64%. Entretanto, ao avaliar o parâmetro de rugosidade Rz, verifica-se que a diferença foi mais significativa, alcançando 13,40%. Essa diferença de mais de 10% entre Rz e Sz pode ser atribuída à escolha das regiões pelas quais foram considerados os planos de medição, já que eles são unidimensionais. O mesmo se aplica para a medida de Sa, pois a escolha da área de medição pode sofrer algum efeito pontual de pico elevado ou vale profundo, de tal modo que a média Sz pode ser elevada. De qualquer forma, a diferença percentual de 13,4% pode ser considerada adequada dentro do espectro de variabilidade de medida de rugosidade em processos de fabricação.

Tabela 3. Valores de rugosidade 2D das amostras produzidas pelo processo MA-DED

Medida	Ra [μm]	Rz [μm]
1	103,83	612,72
2	93,60	609,27
3	111,57	806,86
4	88,25	668,36
Média	99,31	674,30
Desvio $\pm$	9,02	80,04
Variação %	9,08	11,87

Analisando-se a topografia das amostras de LP-DED microfresadas, na Fig. 4a é observada a imagem da topografia tridimensional e na Fig. 4b a imagem bidimensional da superfície usinada. Nota-se que a topografia microusinada encontra-se basicamente no plano médio entre picos e vales, representado pela cor verde. Apenas picos e vales pontuais nas cores vermelha e azul, respectivamente, são evidenciados na superfície. Isso significa que a rugosidade dos canais microfresados reduziu significativamente quando comparada com a peça LP-DED. Esta avaliação quantitativa será feita na sequência. Ao examinar a Fig. 4b (vista superior do canal micro-usinado), é possível constatar as marcas de avanço da microfresa, dentro do canal de abertura, mas também dentro de cada largura de usinagem ou penetração de trabalho (a_e). Não se observa danos na superfície microfresada, nem rebarbas nas interfaces entre passes, tampouco nas extremidades do canal, o que indica que a formação de cavaco deu-se de forma adequada ante os parâmetros de usinagem especificados. As microrregiões escuras identificadas na imagem são áreas pontuais de oxidação, não consideradas nas medições de rugosidade.

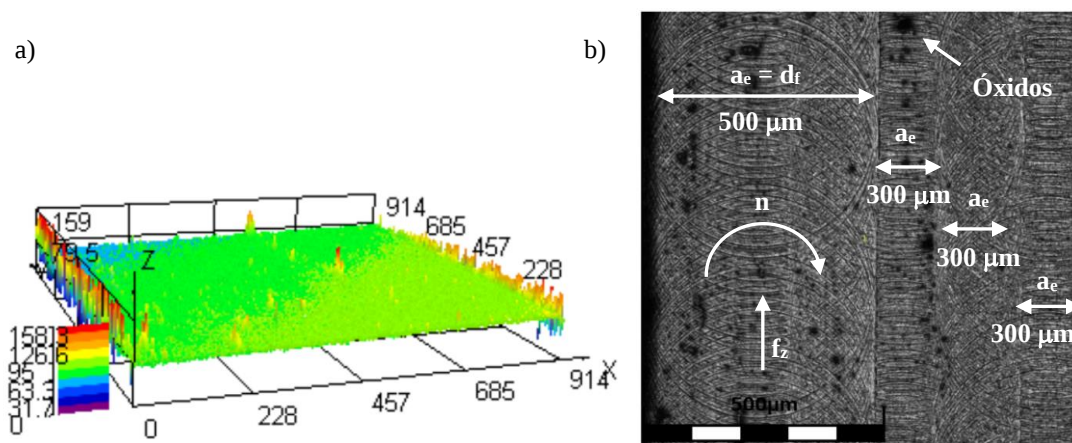


Figura 4. (a) Topografia tridimensional e (b) superficial da amostra microfresada com $f_z = 12 \mu\text{m/z}$

Os dados de rugosidade medidos para os dois avanços da microfresa são apresentados na Tab. 4. De forma equivalente às medidas de rugosidade das amostras fabricadas por LP-DED, a Tab. 4 também mostra as rugosidades médias e máximas tridimensionais S_a e S_z , bem como as rugosidades estatísticas de 3ª e 4ª ordens *Skewness* S_{sk} e *Kurtosis* S_{ku} . Comparando as rugosidades entre os avanços da microfresa, verifica-se que as superfícies não são equivalentes se considerar os valores médios do parâmetro S_a e suas variabilidades, ou seja, para o maior avanço, a rugosidade média planar aumentou. Isso também ocorre com a rugosidade S_{ku} , porém inversamente proporcional ao avanço da ferramenta, isto é, o *Kurtosis* aumenta com a diminuição do avanço. Os demais parâmetros de rugosidade, S_z e S_{sk} , não se mostraram dependentes do avanço da microfresa, pois suas variabilidades são coincidentes. Estes resultados demonstram que, mesmo duplicando o avanço por aresta da ferramenta, alguns parâmetros de rugosidade são afetados e outros não.

Analisando as rugosidades estatísticas, verifica-se que ambas as superfícies apresentam concentração de material nos vales da rugosidade ($S_{sk} \gg 0$) e picos ou vales muito pontuais nas superfícies e pontiagudos ($S_{ku} \gg 3$). Ao comparar estes resultados com aqueles oriundos das amostras de LP-DED, constata-se a grande melhora do acabamento das amostras, alcançando uma redução de 96,79% a 97,32% para S_a e de 78,97% a 80,13% para S_z . Do ponto de vista estatístico, as superfícies microfresadas continuaram com prevalência de picos e picos ou vales pontuais e íngremes, porém sem a tendência de comportamento Gaussiano.

Tabela 4. Valores de rugosidade 3D das amostras microfresadas.

Medida	$f_z = 12 \mu\text{m/z}$				$f_z = 24 \mu\text{m/z}$			
	Sa [μm]	Sz [μm]	Ssk [-]	Sku [-]	Sa [μm]	Sz [μm]	Ssk [-]	Sku [-]
1	2,70	195,80	6,04	88,03	2,81	207,60	5,56	69,81
2	2,66	119,70	2,38	-	3,60	153,30	-	-
3	2,70	194,80	6,04	88,01	3,29	145,70	3,97	35,41
4	2,79	144,60	-	-	3,27	112,10	-	-
Média	2,71	163,73	4,82	88,02	3,24	154,68	4,76	52,61
Desvio $\pm$	0,05	32,78	1,73	0,01	0,28	34,26	0,79	17,20
Variação %	1,76	20,02	35,80	0,01	8,69	22,15	16,68	32,69

Avaliando as rugosidades média e máxima 2D (perfil) das superfícies microfresadas para os dois avanços por aresta, é possível observar na Fig. 5a a vista superior do fundo do canal microfresado, bem como os 19 planos de medição, dos quais 4 foram adotados nas medições nas regiões das 3 larguras de usinagem. A Figura 5b apresenta a mesma superfície, porém obtida com o modo laser acionado no microscópio confocal, contendo a gradação de cores que representa a topografia da amostra. As regiões na imagem apontadas por setas denotam oxidações localizadas e a faixa vertical à esquerda na imagem indica rebarba formada devido ao corte discordante durante a usinagem do canal de abertura.

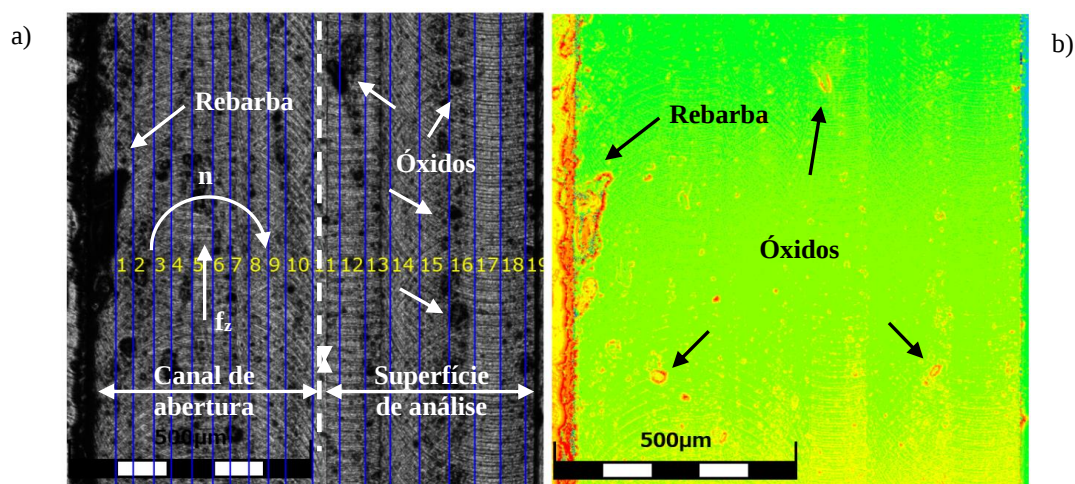


Figura 5. (a) Planos de medição e (b) topografia superficial das amostras microfresadas.

Em termos quantitativos, a rugosidade média Ra aumentou com o incremento do avanço por dente da microfresa, mas a rugosidade máxima pico-vale Rz não foi sensível ao aumento do avanço, uma vez que a variabilidade das medidas foram coincidentes para as duas condições de usinagem.

Tabela 5. Valores de rugosidade 2D das amostras microfresadas.

Medida	$f_z = 12 \mu\text{m/z}$		$f_z = 24 \mu\text{m/z}$	
	Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]
1	2,69	35,17	7,39	-
2	2,47	32,27	-	19,77
3	2,06	23,01	3,03	57,61
4	1,99	26,94	3,29	43,95
Média	2,30	29,35	4,57	40,44
Desvio $\pm$	0,29	4,70	1,99	15,64
Variação %	12,56	16,02	43,69	38,68

Ao comparar as rugosidades 2D e 3D, verifica-se que Sa foi 1,18% maior que Ra para o menor avanço, ao passo que ambas as rugosidades foram estatisticamente iguais para o maior avanço da ferramenta. Uma diferença significativa foi encontrada entre Sz e Rz para os dois avanços por aresta. Para o menor avanço, a razão $Sz/Rz = 5,57$ e para o maior avanço, $Sz/Rz = 3,82$. Tal diferença pode ter ocorrido pela escolha dos planos ou áreas de medição, ou ainda por conta de danos na superfície microfresada não identificados ao longo das medições. Comparando-se as rugosidades 2D média

e máxima do processo de microfresamento e LP-DED, constata-se que o processo de usinagem aprimorou o acabamento das peças impressas entre 94% e 97,68%.

4. CONCLUSÕES

Este artigo tratou da avaliação da rugosidade de peças fabricadas por manufatura aditiva com pó de Ti-6Al-4V e pós-processadas por microfresamento de topo reto. O processo LP-DED gerou rugosidades 3D em torno de 100 μm Sa e 780 μm Sz. Além disso, produziu topografias com predominância de picos (*Skewness* maior que zero) e picos ou vales pontuais e íngremes (*Kurtosis* maior que 3). Como os valores estatísticos de Ssk e Sku ficaram muito próximos dos seus *thresholds* zero e três, respectivamente, pode-se inferir que as superfícies são Gaussianas em simetria das alturas e profundidades de pico e vales, e distribuição e formato de picos e vales.

O processo de microfresamento aprimorou significativamente o acabamento das peças impressas, alcançando o intervalo entre 2,7 e 3,2 μm Sa, e 154 e 164 μm Sz, para avanços por aresta de 12 e 24 $\mu\text{m}/\text{z}$, representando um decréscimo de rugosidade maior que 90%. As superfícies microfresadas mantiveram o padrão de simetria e distribuição de picos e vales das amostras oriundas da manufatura aditiva, ou seja, ausência de material na superfície, com picos e vales pontiagudos e distribuídos localmente. Ao comparar rugosidades bi e tridimensionais dentro de cada processo de fabricação, foram encontradas diferenças entre as amplitudes de Sz e Rz para as amostras microfresadas. Isso pode ter ocorrido em função das escolhas das áreas de medição da rugosidade 3D e da localização dos planos de medição da rugosidade 2D.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem às agências de fomento científico FAPESP, CNPq e CAPES pelo apoio financeiro à pesquisa, bem como ao Prof. Tit. Reginaldo Teixeira Coelho e Prof. Assoc. Eraldo Jannone da Silva, do Laboratório de Processos Avançados e Sustentabilidade (LAPRAS) pelo apoio no uso dos equipamentos de manufatura aditiva e microscopia laser confocal.

6. REFERÊNCIAS

- Alves, S.F. e Wassal, T., 2009. In vitro evaluation of osteoblastic cell adhesion on machined osseointegrated implants. *Brazilian Oral Research*, Vol. 23, p. 131-136.
- Armstrong, M., Mehrabi, H. e Naveed, N., 2022. An overview of modern metal additive manufacturing technology. *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 84, p. 1001-1029.
- Bonaiti, G., Parenti, P., Annoni, M. e Kapoor, S., 2017. Micro-milling machinability of DED additive titanium Ti-6Al-4V. *Procedia Manufacturing*, Vol. 10, p. 497-509.
- Dezaki, M.L., Serjouei, A., Zolfagharian, A., Fotouhi, M., Moradi, M., Ariffin, M.K.A. e Bodaghi, M., 2022. A review on additive/subtractive hybrid manufacturing of directed energy deposition (DED) process. *Advanced Powder Materials*, Vol. 1, 100054.
- Hanawa, T., 2019. Titanium-tissue interface reaction and its control with surface treatment. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, Vol. 7, 170.
- Kulkarni, M., Mazare, A., Gongadze, E., Perutkova, S., kralj-Iglic, V., Milosev, I., Schmuki, P., Iglic, A. e Mozetic, M., 2015. Titanium nanostructures for biomedical applications. *Nanotechnology*, Vol. 26, 062002.
- Kumbhar, N.N. e Mulay, A.V., 2018. Post processing methods used to improve surface finishing of products which are manufactured by additive manufacturing technologies: a review. *Journal of the Institution of Engineers (India): Series C*, Vol. 99, p. 481-487.
- Lim, J.S., Oh, W.J., Lee, C.M. et al. 2021. Selection of effective manufacturing conditions for directed energy deposition process using machine learning methods. *Sci Rep* 11, 24169.
- Oyelola, O., Crawforth, P., M'Saoubi, R. e Clare, A.T., 2016. Machining of additively manufactured parts: implications for surface integrity. *Procedia CIRP*, Vol. 45, p. 119-122.
- Oyelola, O., Crawforth, P., M'Saoubi, R. e Clare, A.T., 2018. On the machinability of directed energy deposited Ti6Al4V. *Additive Manufacturing*, Vol. 19, p. 39-50.
- Ribeiro, G.E. Diaz, V.E.W, Sanitá, W.R.V, Rodrigues, A.R., Coelho, R.T., 2023. Effect of laser power and powder morphology on surface roughness of Ti6Al4V produced by laser powder directed energy deposition. *Proceedings of the 12th Brazilian Manufacturing Engineering Congress*. Brasília, Brazil. (In Press)
- Svetlizky, D., Das, M., Zheng, B., Vyatskikh, A.L., Bose, S., Bandyopadhyay, A., Schoenung, J.M., Lavernia, E.J. e Eliaz, N., 2021. Direct energy deposition (DED) additive manufacturing: physical characteristics, defects, challenges, and applications. *Materials Today*, Vol. 49, p. 271-295.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.

ROUGHNESS OF Ti-6Al-4V SPECIMENS PRODUCED BY DIRECTED ENERGY DEPOSITION AND POST-PROCESSED BY MICROMILLING

Willian Roberto Valicelli Sanitá

Alessandro Roger Rodrigues

Geovana Eloizi Ribeiro

Vincent Edward Wong Diaz

Tiago Monteiro Camponucci

Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, Av. Trabalhador São-Carlense, 400, 13.566-590, São Carlos, SP

willian.r.sanita@usp.br, roger@sc.usp.br, geovana_rib@usp.br, vincentw@usp.br, tiago.camponucci@usp.br

Abstract. *Metallic components produced by additive manufacture have different microstructures along the material and as a consequence distinct mechanical properties e machinability. In addition, these components are anisotropic by complicating the post-processing by machining. The metallic implants field has been benefited with these technologies given that additive manufacture enables to obtain pieces individualized with complex geometry while machining processes can improve functional surfaces in terms of finishing, dimensional and geometric tolerances. Thereupon, this paper evaluated Ti-6Al-4V specimens applied to implants produced by Direct Energy Deposition and post-processed by micromilling. The additive manufacture process parameters were kept constant whilst the feed per tooth in micromilling varied at two levels (12 e 24 $\mu\text{m}/\text{z}$). The results showed both specimens from additive manufacture and micromilling yielded surfaces with lack of material (Skewness > 0) with spike peaks and valleys (Kurtosis > 3). Arithmetic mean roughness S_a reached approximately 100 μm and 3 μm for printed and micro milled parts, respectively, i.e. a significant reduction of more than 90%. The same behavior took place with for peak-valley roughness S_z with gain by about 80%. Differences were observed between 2D and 3D roughness probably due to the measurement regions or eventual surface defects not noted during the finishing analysis. These results demonstrate the additive manufacture produces rougher surfaces. Depending on components application, post-processing to improve finishing, geometry and dimensions can be needed.*

Keywords: Additive Manufacturing; LP-DED; Titanium; Micromilling; Roughness.

RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.