

ESTUDO DA FORMAÇÃO DE REBARBAS NO MICROFRESAMENTO DE PEÇAS PRODUZIDAS POR MANUFATURA ADITIVA

Cleiton Lazaro Fazolo de Assis

Instituto Federal de São Paulo – Campus Votuporanga, Av. Jerônimo Figueira da Costa 3014 – Pozzobon, Votuporanga – SP 15503-110

fazolocla@ifsp.edu.br

Reginaldo Teixeira Coelho

Universidade de São Paulo – Campus São Carlos, Avenida Trabalhador São-carlense 400 – Centro, São Carlos – SP, 13566-590

rtcoelho@sc.usp.br

Resumo. A microusinagem possibilita fabricar peças em escalas reduzidas para aplicações em diversas áreas. Nesse sentido, o microfresamento apresenta a vantagem de produzir componentes com alta razão de aspecto e geometrias complexas. Associado a processos como a manufatura aditiva, seria possível conciliar diferentes técnicas para a geração de produtos inovadores e capazes de atender a novas demandas tecnológicas. O objetivo desta pesquisa foi estudar a formação de rebarbas em peças produzidas por manufatura aditiva, submetidas a operações de microfresamento. Microcanais foram usinados em peças de aço inoxidável 316L. As variáveis dos testes de usinagem foram velocidade de corte, profundidade de usinagem e avanço por dente. Nos testes foram usinados microcanais com microfresas de topo esférico num primeiro momento, com posterior repasse nos microcanais com microfresas de topo reto. Todas as análises foram feitas com auxílio de microscopia laser 3D. Os resultados indicaram que uma usinagem inicial com microfresas de topo esférico e avanço por dente maior que o raio de aresta da ferramenta de corte, seguida de repasse com microfresa de topo reto, gerou microcanais com menos rebarbas quando comparados as outras condições de usinagem. Uma combinação entre parâmetros de corte e geometria de microfresas favoreceu a minimização das rebarbas.

Palavras chave: Microfresamento. Rebarbas. Microcanais. Manufatura Aditiva.

1. INTRODUÇÃO

O estudo de técnicas de manufatura de microdispositivos passou a ser mais amplo a partir de 1970, com a necessidade de se produzir microprocessadores de silício para a crescente indústria da informática (REYS et al., 2002). Por meio de técnicas de impressão, camadas do *chip* eram confeccionadas e depois sobrepostas de forma a gerar as características geométricas do dispositivo (Grzybowski et al., 1998). No entanto, conforme o uso de outros tipos de materiais foi tornando-se necessário, outras técnicas tiveram que ser desenvolvidas, criando uma maior diversidade de processos de fabricação, além de novos estudos visando resolver problemas de efeitos de escala, precisão dimensional e qualidade superficial inerentes a estes dispositivos (Mian, Driver e Mativenga, 2011; Vázquez et al., 2014).

Em razão desse viés, processos de fabricação como o microfresamento tornaram-se ainda mais relevantes, principalmente a partir dos anos 2000, com maior número de publicações científicas sobre o tema, explorando outras possibilidades de fabricação em materiais diversos, tais como cerâmicas, polímeros e metais (Camara et al., 2012). Apesar do processo de microfresamento ser interessante para a geração de microestruturas 3D complexas, estudos foram necessários para minimizar efeitos da microestrutura de materiais convencionais durante o corte em microescala (Mian, Driver e Mativenga, 2009).

Em paralelo à evolução da microfabricação, e sem uma relação direta, houve o desenvolvimento da manufatura aditiva. Inicialmente, o objetivo foi produzir peças com geometrias 3D pelo processo de deposição de camadas de material. Os primeiros processos utilizavam materiais poliméricos para a estrutura da peça e atualmente há processos de adição capazes de produzir peças metálicas, com materiais como o titânio, alumínio e aço inoxidável (Wong e Hernandez, 2012). Este avanço na fabricação de peças abriu alternativas para a produção de peças com geometrias que não poderiam ser atingidas por meio dos processos de usinagem ou conformação mecânica (Liou et al., 2007).

Técnicas de manufatura aditiva poderiam ser aplicadas para a fabricação de dispositivos microfluidicos, capazes de conduzir pequenos volumes de líquidos, visando microreações químicas ou análises laboratoriais (Bhattacharjee et al., 2016). Contudo, apesar da alta resolução alcançada, por exemplo, por técnicas de deposição a laser, ainda há limitações quanto ao controle do acabamento das microestruturas necessárias a condução dos microfluidos (Larmour, Bell e Saunders, 2007). Além disso, a rugosidade é fator importante para o controle da velocidade de escoamento dos microfluidos e respectivo controle das reações químicas a serem conduzidas no dispositivo (Bernandin, Stebbins e

Mudawar, 1996). Dessa forma, uma interação entre manufatura aditiva e processos de microfabricação por remoção mecânica seriam uma alternativa para a fabricação de dispositivos em microescala com precisão geométrica e controle do acabamento (Newman et al., 2015).

Além das questões relacionadas ao acabamento, há também problemas inerentes aos processos de remoção mecânica, como o microfresamento, que necessitam de estudos para solução. A formação de rebarbas surge como um dos principais focos a serem abordados. Em escalas de usinagem reduzidas, as rebarbas afetam significativamente a qualidade dos componentes e são difíceis de serem removidas (Assis, Jasiñevicius e Rodrigues, 2015). Sendo assim, mesmo na microusinagem de peças metálicas, obtidas por manufatura aditiva, a compreensão do fenômeno e abordagens para minimização da formação de rebarbas impele o pesquisador na busca por alternativas que viabilizem a integração das técnicas aditivas e subtrativas para a produção de peças com qualidade.

Neste trabalho foram realizados experimentos para verificar o efeito dos parâmetros de corte na formação de rebarbas no microfresamento de peças de aço inoxidável, produzidas por manufatura aditiva. Microscopia laser 3D foi empregada na geração de imagens tridimensionais dos canais microusinados para estudo da formação de rebarbas. Uma abordagem com repasse de microfresas nos microcanais foi aplicada, visando minimizar as rebarbas.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Os testes de microfresamento foram realizados em um centro de usinagem CNC Kern D-82418, com velocidade máxima de rotação do eixo-árvore de 50000 rpm. Cada ensaio de usinagem empregou uma ferramenta nova. A Figura 1 apresenta a montagem experimental dos ensaios de usinagem.

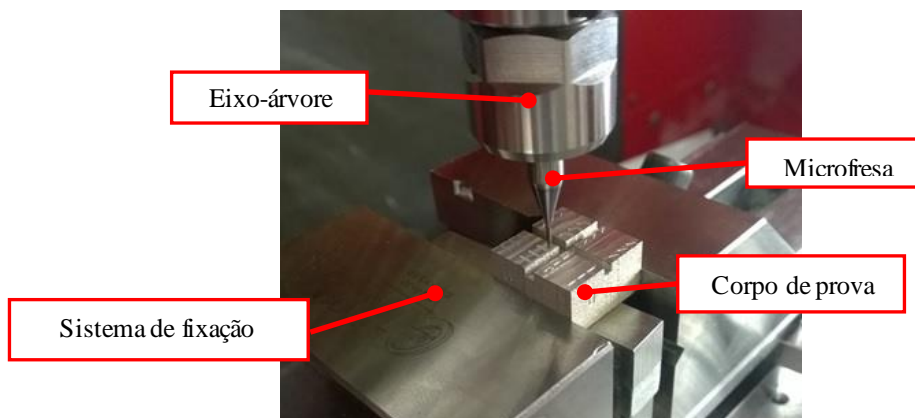


Figure 1. Montagem experimental do microfresamento de canais em peças produzidas por manufatura aditiva.

As ferramentas de corte utilizadas foram microfresas de topo reto e esférico de metal duro, sem recobrimento, fornecidas pela MMC Metal do Brasil (subsidiária Mitsubishi). Os raios de aresta de corte das microfresas foram medidos com auxílio de um microscópio confocal laser 3D da marca Olympus, modelo OLS4000. Oito medidas de raio foram feitas para cada aresta de corte, e um valor médio com respectivo desvio padrão foi calculado. O valor médio obtido foi de 2 μm . A avaliação do raio de aresta das microfresas foi importante para a determinação dos valores de avanço por dente dos experimentos de microfresamento. Dessa forma, efeitos de mínima espessura de corte poderiam ser investigados com relação a formação de rebarbas. Foram utilizadas microfresas de diâmetros de 300 μm (topo reto) e 800 μm (topo reto e esférico).

Os parâmetros de usinagem adotados nos testes de microfresamento foram velocidade de corte de 42 e 60 m/min, profundidades de usinagem de 30, 50 e 300 μm , e avanço por dente de 1 e 3 $\mu\text{m}/\text{z}$. Nos testes foram usinados microcanais com microfresas de topo esférico num primeiro momento, em seguida microfresas de topo reto realizaram um repasse nos mesmos microcanais. Contudo, uma combinação de parâmetros de usinagem foi realizada com o propósito de identificar as condições de usinagem que favoreçam a técnica de “reusinagem” dos microcanais para minimizar a formação de rebarbas. Com base nesta estratégia, microfresas de diferentes diâmetros foram utilizadas, visando assegurar a largura original dos microcanais produzidos com microfresas de topo esférico.

A Tabela 1 apresenta as condições de usinagem adotadas para a estratégia de redução de rebarbas. Cada microcanal, identificado por uma letra do alfabeto, foi usinado e reusinado com diferentes diâmetros de microfresas de acordo com a ordem apresentada. A menor velocidade de corte (v_c) aplicada às ferramentas de 300 μm de diâmetro é devida ao limite máximo alcançado sem que ocorresse quebra da microfresa ao entrar em contato com o corpo de prova, conforme estabelecido em pré-testes de usinagem. A variação da profundidade de usinagem (a_p) para os microcanais A, B, C e D ocorreu em virtude de manter todos os microcanais com a mesma largura de corte para efeitos de comparação dos resultados.

Tabela 1. Condições de usinagem para a estratégia de minimização de rebarbas.

Microcanal	Microfresa	Diâmetro [μm]	v_c [m/min]	f_z [$\mu\text{m}/z$]	a_p [μm]	a_e [μm]
A	Topo esférico	800	60	1	30	300
	Topo reto	300	42	1	50	300
B	Topo esférico	800	60	1	30	300
	Topo reto	300	42	3	50	300
C	Topo esférico	800	60	3	30	300
	Topo reto	300	42	1	50	300
D	Topo esférico	800	60	3	30	300
	Topo reto	300	42	3	50	300
E	Topo esférico	800	60	1	300	800
	Topo reto	800	60	1	300	800
F	Topo esférico	800	60	1	300	800
	Topo reto	800	60	3	300	800
G	Topo esférico	800	60	1	300	800
	Topo reto	800	60	1	300	800
H	Topo esférico	800	60	3	300	800
	Topo reto	800	60	3	300	800

Para os experimentos de microfresamento em peças produzidas por manufatura aditiva, foi utilizado uma liga de aço inoxidável 316L. Corpos de prova de geometria 20x20x11 mm foram produzidos pela técnica de *Powder Bed Fusion* (PBF), utilizando uma Concept Laser, modelo M2 com 200 W e fusão seletiva em placa tipo xadrez. A Figura 2 apresenta micrografias ópticas da microestrutura dos corpos de prova utilizados nos testes de usinagem. As análises micrográficas revelaram uma microestrutura austenítica de formato lenticular e isenta das fases ferrita delta, chi e sigma. As propriedades mecânicas do material das peças são limite de escoamento de 528 MPa e limite de resistência a tração de 607 MPa.

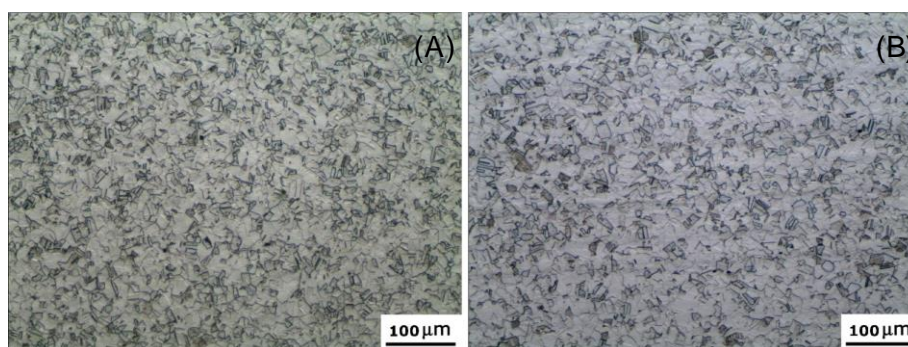


Figura 2. Microestrutura dos corpos de prova gerados por manufatura aditiva. Seção transversal (a) e longitudinal (b).

A caracterização dos microcanais usinados foi realizada com auxílio de microscopia laser 3D, com uso do mesmo equipamento aplicado para medição do raio de aresta das ferramentas de corte. Foram feitas imagens dos microcanais usinados sem a técnica de reusinagem proposto neste trabalho e após a aplicação da técnica de reusinagem, visando a comparação e teste da eficácia da operação de usinagem empregada. A integração entre processos de fabricação por remoção e adição de material tem sido uma tendência, e estudos acadêmicos seguem em andamento para compreensão e aprimoramento dessa técnica, atualmente conhecida como Manufatura Híbrida. Os canais foram microusinados ao longo de todo o comprimento da seção de ensaio dos corpos de prova. O objetivo foi realizar uma avaliação ampla da formação de rebarbas com base nas operações de usinagem propostas. Sendo assim, foram analisados o ponto de entrada e saída das microfresas nos microcanais, e também as extensões retas e curvas.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nas análises serão apresentadas imagens representativas de seções dos microcanais, com vias a comparação qualitativa da formação de rebarbas entre as diferentes geometrias de microcanais usinados. Foram feitas associações de microfresas de topo reto e topo esférico com diâmetros de 300 e 800 μm de diâmetro, e os avanços por dente de 1 e 3 $\mu\text{m}/z$, escolhidos por serem menor e maior que o raio de aresta de corte das microfresas, respectivamente. Esta matriz fatorial favoreceu oito condições de usinagem, cujos resultados e discussão serão apresentados a seguir.

A Figura 3 apresenta imagens produzidas por microscopia laser de microcanais usinados com microfresas de geometria e diâmetros variados, e dois avanços por dente. A profundidade de usinagem foi de 50 μm para todos os microcanais. Na usinagem com microfresas de topo reto de 300 μm de diâmetro, houve formação de rebarbas em ambos os avanços por dente aplicados e nas duas laterais superiores dos microcanais. Contudo, o aumento do avanço por dente favoreceu o aumento das rebarbas e deformação intensa na região de corte discordante do microcanal. A usinagem com microfresas de topo esférico de 800 μm favoreceu a formação de microcanais sem rebarbas aparentes, principalmente no menor avanço por dente. Para a usinagem com microfresas de topo reto de 800 μm houve formação de rebarbas em ambos os lados dos microcanais, apesar de o maior avanço por dente ter favorecido uma aparente redução nas rebarbas no lado de corte concordante dos microcanais.

No microfresamento com microfresas de topo reto, principalmente com diâmetros reduzidos, efeitos de mínima espessura de corte tendem a causar intensa deformação plástica do material. O material é então empurrado para a lateral do microcanal resultando na formação de rebarbas, e esse efeito tende a ser mais notável com o aumento do volume de material a ser removido, nesse caso, relacionado ao aumento do avanço por dente. Por outro lado, o uso de microfresas de topo esférico tende a minimizar esse efeito pelo fato de a aresta de corte estar inclinada sobre as laterais dos microcanais, devido ao raio do topo esférico da microfresa (R) ser muito maior que a profundidade de usinagem ($R \gg a_p$). Esta geometria de corte favorece a remoção de rebarbas que tenderiam a se formar nas laterais dos microcanais.

Com base nestes resultados foi proposta uma matriz experimental na qual o objetivo foi a produção de microcanais com perfil retangular, tirando proveito do efeito das microfresas de topo esférico na redução da formação de rebarbas, conforme resultados apresentados pela Fig. 3. Dessa forma, seria possível reduzir as rebarbas formadas com microfresas de topo reto e também a deformação plástica sem remoção de material, observada em microcanais usinados com microfresas com diâmetros de 300 μm em determinadas condições de usinagem.

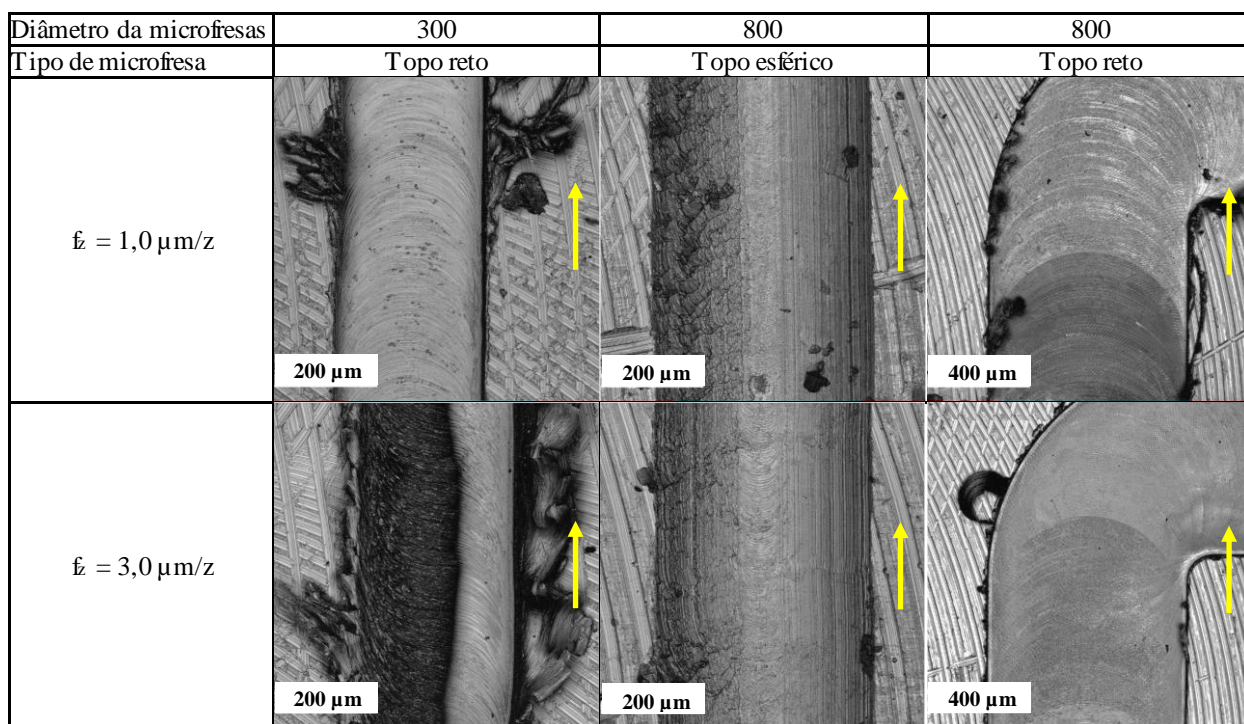


Figura 3. Imagens de microscopia laser de microcanais usinados com microfresas de topo reto e esférico de 300 e 800 μm de diâmetro e avanços por dente de 1 e 3 $\mu\text{m/z}$. As setas indicam o sentido do avanço das microfresas.

A Figura 4 apresenta imagens produzidas por microscopia laser de microcanais usinados com estratégia para redução de rebarbas em microcanais de perfil usinado por microfresas de topo reto. As letras nas imagens são uma referência às condições de usinagem da Tab. 1. A análise qualitativa das imagens revela uma significativa redução da formação de rebarbas dos microcanais quando comparadas as imagens da Fig. 3, principalmente nos microcanais usinados com as condições de usinagem C, D e H. Nos microcanais usinados com as condições F e G, a redução das rebarbas foi mais aparente na lateral superior do lado de corte concordante.

Estabelecendo uma relação entre os dados da Tab. 1 e as imagens da Fig. 4, algumas considerações podem ser feitas. As condições C, D e H apresentaram microcanais sem rebarbas aparentes em ambas as laterais superiores. Em comum, estas condições de usinagem aplicaram um avanço por dente inicial de 3 $\mu\text{m/z}$ no microfresamento com microfresa de topo esférico de 800 μm de diâmetro. As condições A e B apresentaram rebarbas em ambas as laterais superiores dos microcanais. Em comum, estas condições de usinagem aplicaram avanço por dente inicial de 1 $\mu\text{m/z}$. Contudo, o uso de

avanco de $3 \mu\text{m}/\text{z}$ no repasse de usinagem com microfresa de topo reto de $300 \mu\text{m}$ de diâmetro na condição B resultou em maiores rebarbas quando comparada à condição A.

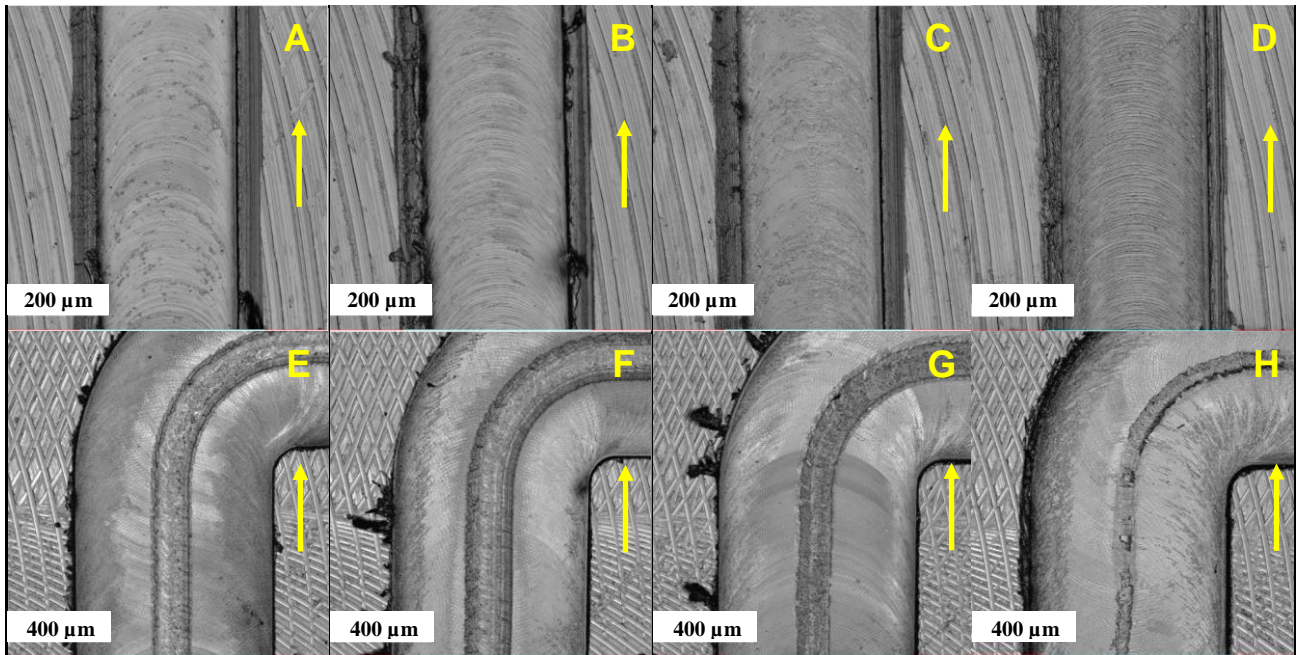


Figura 4. Imagens de microscopia laser de microcanais usinados com estratégia de minimização de rebarbas. As setas indicam o sentido do avanço das microfresas.

As condições E, F e G apresentaram rebarbas mais aparentes no lado de corte discordante dos microcanais. Para estas condições de usinagem, o avanço por dente do primeiro passe com microfresa de topo esférico foi de $1 \mu\text{m}/\text{z}$ e microfresas de $800 \mu\text{m}$ de diâmetro foram utilizadas nas usinagens.

De acordo com as análises, o primeiro passe de usinagem com microfresa de topo esférico e avanço de dente de $3 \mu\text{m}/\text{z}$ favoreceu a produção de microcanais sem rebarbas aparentes. É possível que com o aumento do avanço por dente o mecanismo de formação de rebarba seja menos beneficiado pelos efeitos de mínima espessura de corte, que tendem a formar rebarbas nas microusinagens com avanços por dente menores que o raio de aresta de corte das microfresas, conforme observado nas condições A e B.

Nos microcanais usinados com primeiro passe de $1 \mu\text{m}/\text{z}$ e microfresas de $800 \mu\text{m}$, o lado de corte discordante formou mais rebarbas em comparação ao lado concordante devido aos efeitos de mínima espessura de corte, pois a aresta cortante da microfresa realiza a deformação plástica do material da peça até atingir o ponto de ruptura do material e posterior cisalhamento. O material previamente deformado é empurrado para a lateral do microcanal, formando as rebarbas. Na aplicação do segundo passe de usinagem com microfresas de topo reto, o volume de material a ser removido foi menor, pois a maior parte foi removida na usinagem inicial, dificultando a formação de rebarbas e favorecendo a qualidade dos microcanais usinados.

4. CONCLUSÕES

Peças de aço inoxidável 316L foram fabricadas por manufatura aditiva e posteriormente submetidas a operações de microfresamento, visando abordagens que minimizassem a formação das rebarbas em microcanais. Microfresas de topo reto tenderam a formar mais rebarbas do que microfresas de topo esférico quando submetidas as mesmas condições de usinagem. Aplicando uma relação entre avanço por dente e raio de aresta de corte superior a 1, para as microfresas de topo esférico, no primeiro passe de usinagem, a tendência é formar canais com menos rebarbas após o segundo passe de usinagem, quando comparado as outras condições de usinagem. A estratégia de combinação de parâmetros de corte e geometria das microfresas favoreceu a redução da formação de rebarbas, em condições específicas de usinagem, sendo uma abordagem a ser considerada na fabricação de microdispositivos. Os resultados promoveram avanços na compreensão do mecanismo de formação de rebarbas, além de possibilitar a abordagem de estudos de caso de microusinagem que necessitem que estratégias de minimização das rebarbas, evitando a necessidade de retrabalho da peça para remoção de rebarbas, o qual pode ser de difícil execução considerando as geometrias e dimensões reduzidas dos microcomponentes. Análises de rugosidade e medições das rebarbas serão realizadas na continuidade da pesquisa.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo fomento (Processo 468309/2014-4), ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT) pelo suporte técnico e a MMC Metal do Brasil (subsidiária Mistubishi) pelas microfresas.

6. REFERÊNCIAS

- Assis C. L. F., Jasinevicius R. G., Rodrigues A. R., 2015. "Micro end-milling of channels using ultrafine-grained low-carbon steel". *International Journal Advanced Manufacture Technology*, Vol. 77, p. 1155-1165.
- Bernandin J. D., Stebbins C. J., Mudawar I., 1997. "Effects of surface roughness on water droplet impact history and heat transfer regimes". *International Journal Heat Mass Transfer*, Vol. 40, p. 73-88.
- Bhattacharjee N., Urrios A., Kang S., Folch A., 2016. "The upcoming 3D-printing revolution in microfluidics". *Lab Chip*, Vol. 16, p. 1720-1742.
- Câmara M. A., Rubio J. C. C., Abrão A. M., 2012. "State of the art on micromilling of materials, a Review". *Journal of Materials Science and Technology*, Vol. 28, p. 673-685.
- Grzbowski B. A., Haag R., Bowden N., Whitesides G. M., 1998. "Generation of micrometer-sized patterns for microanalytical applications using a laser direct-write method and microcontact printing". *Analytical chemistry*, Vol. 70, p. 4645-4652.
- Larmour I. A., Bell S. E. J., Saunders G. C., 2007. "Remarkably simple fabrication of superhydrophobic surfaces using electroless galvanic deposition". *Angewandte Chemie*, Vol. 46, p. 1710-1712.
- Liou F., Slattey K., Kinsella M., Newkirk J., Chou H-N., Landers R., 2007. "Applications of a hybrid manufacturing process for fabrication of metallic structures". *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 13, p. 236-224.
- Mian A. J., Driver N., Mativenga, P. T., 2009. "Micromachining of coarse-grained multi-phase material". *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 223, p. 377-385.
- Mian A. J., Driver N., Mativenga P. T., 2011. "Identification of factors that dominate size effect in micro-machining". *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 51, p. 383-394.
- Newman S., Zhu Z., Dhokia V., Shokrani A., 2015. "Process planning for additive and subtractive manufacturing technologies". *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, Vol 64, p. 467-470.
- Reyes D. R., Lossifidis D., Auroux P. A., Manz A., 2002. "Micro Total Analysis Systems. 1. Introduction, Theory, and Technology". *Analytical Chemistry*, Vol. 74, p. 2623-2636.
- Vázquez E., Gomar J., Ciurana J., Rodriguez C. A., 2014. "Evaluation of machine-tool motion accuracy using a CNC machining center in micro-milling processes". *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 76, p. 219-228.
- Wong K., Hernandez A., 2012. "A review of additive manufacturing". *International Scholarly Research Network*, Vol. 2012, p. 1-10.

5. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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

BURRS FORMATION EVALUATION DURING MICROMILLING OF WORKPIECES PRODUCED BY ADDITIVE MANUFACTURING

Cleiton Lazaro Fazolo de Assis

Instituto Federal de São Paulo – Campus Votuporanga, Av. Jerônimo Figueira da Costa 3014 – Pozzobon, Votuporanga – SP 15503-110

fazolocla@ifsp.edu.br

Reginaldo Teixeira Coelho

Universidade de São Paulo – Campus São Carlos, Avenida Trabalhador São-carlense 400 – Centro, São Carlos – SP, 13566-590

rtcoelho@sc.usp.br

***Abstract.** Micromachining makes it possible to manufacture parts at reduced scales for applications in several areas. In this sense, micromilling has the advantage of producing components with high aspect ratio and complex geometries. Associated with processes such as additive manufacturing, it would be possible to reconcile different techniques for the generation of innovative products capable of meeting new technological demands. The objective of this research was to study the formation of burrs in pieces produced by additive manufacturing, submitted to micromilling operations. Microchannels were machined in 316L stainless steel workpieces. The machining tests variables were cutting speed, depth of cut and feed per tooth. During machining testes were produced microchannels with ball-nose micromills at a first moment, with later re-machining of the microchannels with flat micromills. All analyses were performed using 3D laser microscopy. The results indicated that an initial machining with ball-nose micromills and feed per tooth larger than the cutting tool edge radius, followed by re-machining with flat micromills, generated microchannels with less burrs when compared to other machining conditions. A combination of cutting parameters and micromills geometry favoured the minimization of burrs.*

Keywords: *Micromilling. Burrs. Microchannels. Additive Manufacturing.*

RESPONSIBILITY NOTICE

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