

Estudo Experimental Da Microusinagem Do Aço Inoxidável 316L Fabricado Por Manufatura Aditiva

Milla Caroline Gomes

Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campus Santa Mônica, CEP: 38408-100, Uberlândia-MG, Brasil.
millagomes150@gmail.com

Marcio Bacci da Silva

Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campus Santa Mônica, CEP: 38408-100, Uberlândia-MG, Brasil.
mbacci@ufu.br

Resumo. A microusinagem é um importante processo de fabricação que tem sido utilizado no pós-processamento de peças metálicas fabricadas pelo processo de Manufatura Aditiva, melhorando a rugosidade superficial e adicionando características a essas peças. Com a crescente produção de peças metálicas pela manufatura aditiva, se torna necessário obter conhecimento da microusinagem destes. Sendo assim, este trabalho possui como objetivo investigar a microusinagem do aço inoxidável 316L fabricado pela Manufatura Aditiva, pelo processo de Deposição com Energia Direcionada (Direct Energy Deposition - DED). Nesta investigação foi avaliado o comportamento do desgaste da microferramenta de corte e o acabamento da superfície microusinada, por meio da análise dos parâmetros R_a e R_q da rugosidade superficial. O desgaste da microferramenta foi medido através da redução do diâmetro da microferramenta, na superfície secundária de folga. Os resultados obtidos demonstraram que no comportamento do desgaste da microferramenta foi possível identificar os três estágios de desgaste, conforme apresentado no desgaste das macroferramentas. Além disso, foi possível observar que os valores de rugosidade foram pequenos, variando de $0,1140 \mu\text{m}$ a $0,1532 \mu\text{m}$ para R_a , e que os parâmetros R_a e R_q apresentaram comportamento semelhante, demonstrando que não existe picos ou vales que se destacam na superfície usinada.

Palavras-chave: Microusinagem, Microfresamento, Manufatura Aditiva, Aço Inoxidável.

1. INTRODUÇÃO

A microusinagem consiste em um importante processo de fabricação que tem sido bastante utilizado por possibilitar a produção de geometrias complexas com alta precisão utilizando uma grande variedade de materiais (Miranda-Giraldo et al., 2017).

Em geral, a microusinagem se diferencia do processo de usinagem convencional pelas dimensões das ferramentas de corte utilizadas, conforme definido por Aramcharoen et al. (2008) e Câmara et al. (2012), que determinam o diâmetro das microferramentas variando de $1 \mu\text{m}$ a $1000 \mu\text{m}$. Já para Masuzawa (2000), o termo “micro” está relacionado a grandezas que variam de $1 \mu\text{m}$ a $999 \mu\text{m}$. Outros pesquisadores também definem este processo com base nos valores da espessura de corte utilizada. Ng et al. (2006), por exemplo, definem a microusinagem quando a espessura de corte varia de 10 nm a $2 \mu\text{m}$.

Os processos de microusinagem não podem ser considerados uma simples redução de escala dos processos convencionais, já que esta redução não terá o mesmo efeito nos fenômenos durante o microcorte. Força de corte, formação de rebarbas, desgaste de ferramenta, e, principalmente, energia específica de corte (Cheng; Huo, 2013), contribuem para o chamado efeito escala, que é definido como o aumento não linear da energia por unidade de volume de material removido, ou energia específica de corte, a partir da diminuição da espessura de corte (Liu; Melkote, 2007). O aumento dessa energia específica ocorre devido ao aumento relativo do volume de material que se deforma plasticamente em relação à quantidade de material removida (Chae; Park; Freiheit, 2006).

Atualmente, estudos têm sido desenvolvidos com relação a aplicação da microusinagem no pós-processamento de peças metálicas fabricadas por Manufatura Aditiva (Allegri et al., 2019; De Assis et al., 2020).

A Manufatura Aditiva possui como princípio a adição de material, camada a camada, baseada em um modelo CAD de computador (Nematollahi, 2019). Estes processos possuem inúmeras vantagens, entretanto, as peças fabricadas ainda possuem algumas características indesejadas como: a presença do efeito escada, baixo acabamento superficial e precisão dimensional. Muitas pesquisas são desenvolvidas para melhorar estas características (Kumbhar; Mulay, 2018). Em algumas são investigados os parâmetros utilizados no processo de fabricação, já em outras, são avaliados a utilização de técnicas de pós-processamento como os processos subtrativos (Vaezi et al, 2013). Existem diversas técnicas que podem

ser utilizadas, dependendo da aplicação e do material da peça, como: operações de microusinagem e macrousinagem, usinagem química e usinagem de fluxo abrasivo (Kumbhar; Mulay, 2018).

Dentre as técnicas de pós-processamento a microusinagem é utilizada por conferir à peça qualidade superficial, compensar as imprecisões geométricas e possibilitar a usinagem de uma grande variedade de materiais que podem ser fabricados pela Manufatura Aditiva (Salonitis et al., 2016; Cheng; Huo, 2013). Além disso, podem ser utilizados para adicionar características às peças (Chua; Leong; Lim, 2003), permitindo que estas tenham a funcionalidade necessária ou o ajuste adequado em uma montagem (Lane et al., 2015).

Sendo assim, diante da importância da utilização da microusinagem em peças metálicas, este trabalho possui como objetivo realizar um estudo experimental para investigar a microusinagem do aço inoxidável 316L obtido por manufatura aditiva.

2. METODOLOGIA

O material utilizado na realização dos ensaios foi o aço inoxidável austenítico AISI 316L fabricado pela Manufatura Aditiva por meio do processo de Deposição com Energia Direcionada (Direct Energy Deposition - DED). Na fabricação desta amostra foi utilizado uma velocidade de deslocamento igual a 2000 mm/min, taxa de alimentação de pó de 5 g/min, 600 W de potência do laser, distância entre linhas de deposição igual a 0,44 mm e estratégia de deposição *Chessboard*. *Chessboard* é uma estratégia de deposição que se assemelha a um tabuleiro de xadrez, conforme apresentado na Fig. 1.

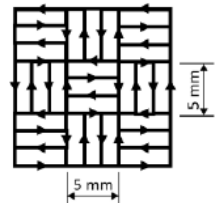


Figura 1 - Estratégia de deposição *chessboard* (Ribeiro et al., 2020).

A composição química em porcentagem de peso do material de trabalho está apresentada na Tab. 1. Esta composição foi obtida por EDS utilizando o MEV da Zeiss, modelo EVO MA10. Nota-se que a diferença na quantidade de carbono se deve à imprecisão do sistema na detecção deste elemento químico. Além disso, observa-se valores diferentes na composição dos elementos Si, Mn e Ni. Sendo estas diferenças associadas aos processos de fabricação utilizados nas amostras: convencional e Deposição com Energia Direcionada.

Tabela 1 - Composição química do 316L obtida por EDS

316L	Composição química em % de peso					
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo
Obtida convencionalmente - De acordo com Villares Metals (2018)	≤ 0,030	≤ 1,00	≤ 2,00	16,00 - 18,00	10,00 - 14,00	2,00 - 3,00
Obtida por EDS – Amostras Impressas	3,50	3,95	5,72	14,45	4,84	2,05

Os ensaios consistiram no microfresamento de topo para a fabricação de microcanais. Para isso foi utilizado a microfresadora modelo CNC Mini-mill/GX, fabricada pela Minitech Machinery Corporation®. Esta máquina-ferramenta possui rotação máxima do eixo árvore de 60 000 rpm e 3 eixos com resolução de posicionamento de 0,1 µm. Ela se encontra instalada sobre uma mesa inercial, especialmente projetada para diminuir a influência de vibrações de fontes externas durante a realização da microusinagem.

As microferramentas utilizadas foram de metal duro, revestidas com (Al, Ti)N, fabricadas pela Mitsubishi Materials. Possuem diâmetro de corte (DC) igual a 0,4 mm, comprimento de corte (APMX) de 0,8 mm, diâmetro (DCON) e comprimento (LF) da haste iguais a 4 mm e 40 mm, respectivamente, e são constituídas por duas arestas de corte e por um ângulo de hélice de 30°. Na Figura 2 tem-se ilustrado as ferramentas utilizadas, com a identificação de cada parâmetro geométrico especificado.

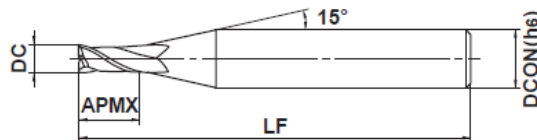


Figura 2 - Parâmetros geométricos das microfresas.

A condição de corte selecionada para a realização dos ensaios está apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 - Condições de Corte

Rotação (rpm)	Velocidade de corte (m/min)	Avanço por dente ($\mu\text{m}/\text{dente}$)	Velocidade de avanço (mm/min)	Profundidade de usinagem (μm)	Penetração de trabalho (μm)
10 000	12,7	5	100	40	400

Para avaliar as condições de corte (Tabela 2), por meio da análise do desgaste da microferramenta e da rugosidade superficial dos canais fabricados, foram realizados 9 canais na amostra, com espaçamento de 1,5 mm entre centros, sendo cada canal correspondente ao comprimento de 10 mm. Portanto, nesta análise, o critério de fim de vida adotado corresponde a usinagem de 9 microcanais.

Para a medição do desgaste, inicialmente imagens de todas as superfícies das microfresas novas foram obtidas para verificar a existência de algum defeito nas mesmas, utilizando um microscópio eletrônico de varredura (MEV), da Hitachi High-Technologies®, modelo TM3000. Após a usinagem de cada microcanal, a microferramenta foi retirada da microfresadora e observada no MEV para análise e obtenção de imagens. O desgaste da microferramenta foi medido na superfície secundária de folga, por meio da redução do diâmetro da ferramenta, conforme ilustrado na Fig. 3.

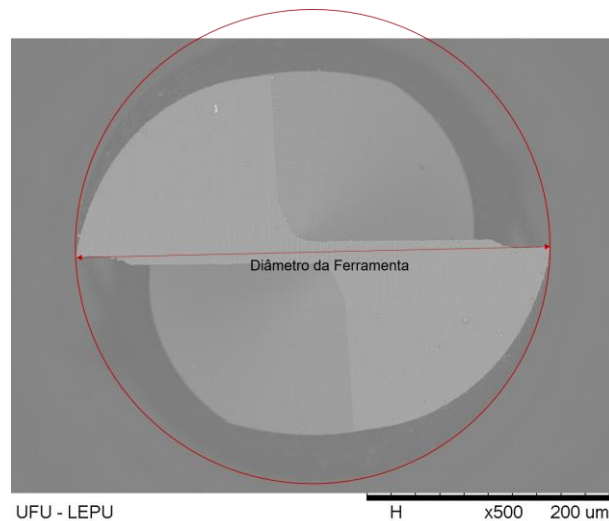


Figura 3 - Medição do desgaste

A medição da rugosidade nos microcanais foi realizada na direção perpendicular as marcas de avanço em 3 diferentes regiões. Os parâmetros analisados foram: desvio aritmético médio (R_a) e desvio médio quadrático (R_q). O R_a foi analisado por ser um parâmetro amplamente utilizado, possibilitando a comparação de resultados. O R_q também foi escolhido por ser um parâmetro sensível às variações no perfil de rugosidade, uma vez que evidencia a presença de picos e vales. O comprimento de amostragem (cut-off) utilizado foi de 0,8 mm e o comprimento de avaliação de 4 mm.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A evolução do desgaste da microfresa pode ser observada na Figura 4. Nota-se que os valores de desgaste são muito pequenos e relativamente muito menores quando comparados com o fresamento convencional. Resultados de desgaste semelhantes foram encontrados por outros pesquisadores, como por exemplo De Oliveira Campos et al. (2020), ao estudar a usinabilidade da liga Ti-6Al-4V impressa. Além disso, observa-se que o comportamento do desgaste apresentado nesta condição de usinagem se assemelha ao comportamento das ferramentas de corte convencionais, onde a curva de desgaste pode ser dividida em três estágios (Boothroyd; Knight, 1989).

Na Figura 4, o primeiro estágio se refere ao desgaste que varia de 0 a 1,28 μm , sendo este caracterizado por um desgaste acelerado devido a adequação da ferramenta ao sistema tribológico (Machado et al., 2011). No segundo estágio, a taxa de desgaste cresce lentamente, de forma praticamente constante, devido a acomodação da ferramenta ao processo e aos mecanismos de desgaste presentes (Machado et al., 2011), conforme apresentado nos pontos correspondentes aos desgastes de 1,28 μm a 1,91 μm . Já no terceiro estágio, tem-se um aumento acentuado da taxa de desgaste que leva a ferramenta, em curto intervalo de tempo, ao fim de sua vida (Machado et al., 2011). Esse estágio está representado a partir do desgaste de 1,91 μm e atinge um valor de 5,74 μm .

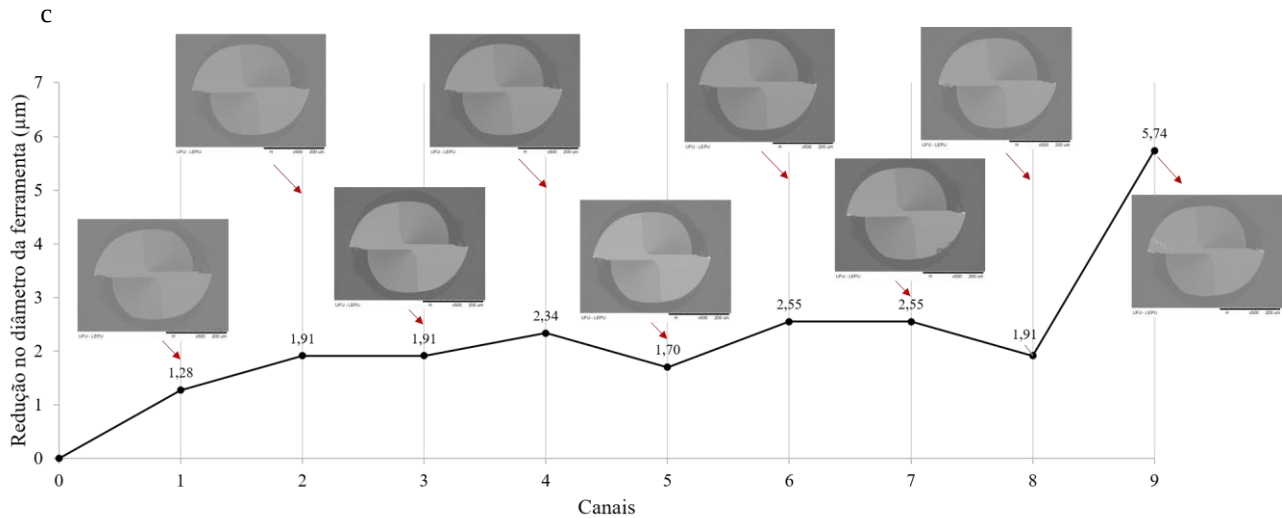


Figura 4 - Evolução do desgaste da microferramenta

É importante ressaltar na Figura 4, que para alguns canais, 5 e 8, houve uma redução do valor medido do desgaste em relação ao comprimento anterior. Isto ocorreu devido ao material da peça aderido à microfresa, conforme apresentado na Figura 5, que dificultou a medição do desgaste. Tal fato, confirma a dificuldade de se determinar o desgaste para os processos de microusinagem devido as dimensões micrométricas das ferramentas de corte.

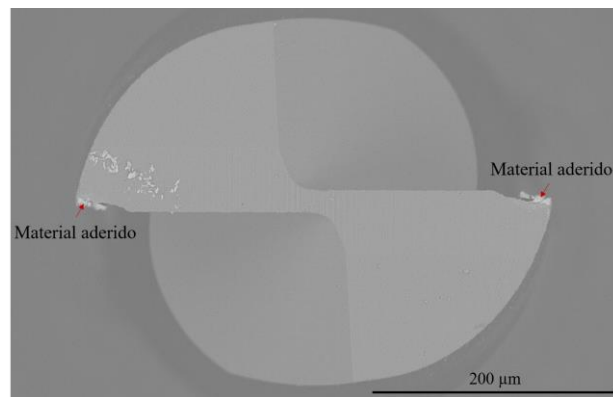


Figura 5 - Material aderido na microfresa

A Figura 6 mostra o gráfico com os valores das rugosidades Ra e Rq para cada canal usinado.

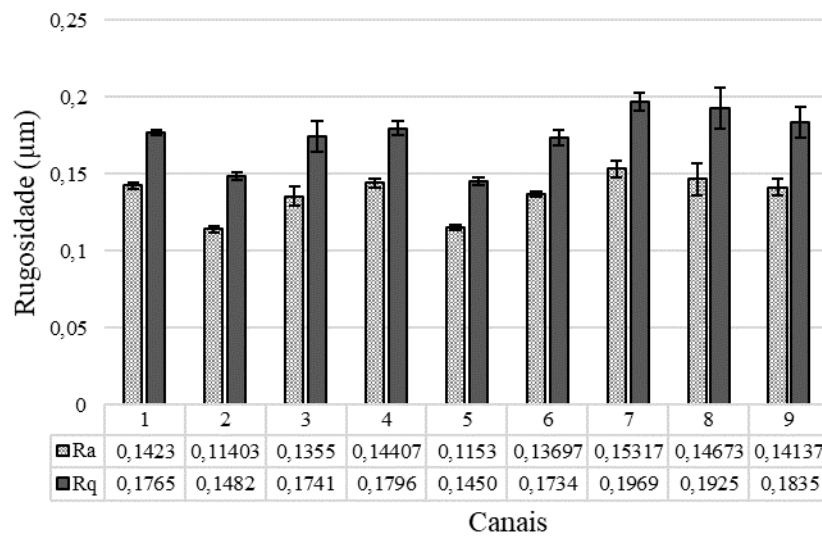
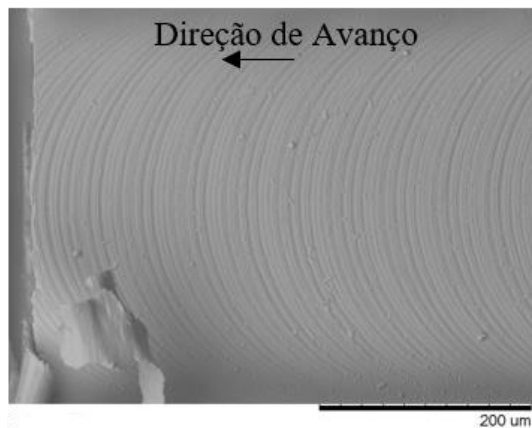


Figura 6 - Média dos resultados das medições de rugosidade Ra e Rq

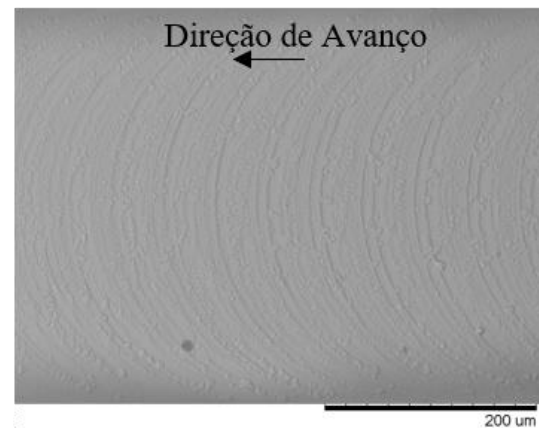
Da Figura 6, pode-se observar que os valores para os parâmetros de rugosidade analisados não apresentam uma variação estatisticamente significativa com relação ao desgaste da ferramenta. Além disso, pode-se notar que os parâmetros Ra e Rq possuem comportamento semelhante, o que significa que não existem picos ou vales que se destacam no perfil de rugosidade das superfícies usinadas.

Analisando Ra, verifica-se que seus valores variaram de 0,1144 μm a 0,1532 μm , sendo estes baixos, principalmente quando comparados com o Ra obtidos em peças retificadas, que devem apresentar valores de rugosidade entre 0,2 μm e 1,6 μm (Diniz, Marcondes, Copinni; 2010).

Ao analisar a qualidade superficial dos microcanais por meio das imagens obtidas no MEV, Figuras 7a e 7b, e pelo perfil de rugosidade, Figuras 7c e 7d, nota-se que não há diferenças discrepantes nas superfícies usinadas, sendo o canal 1 correspondente ao primeiro canal usinado e o canal 9 correspondente ao último. Essa análise confirma o comportamento semelhante encontrado para os parâmetros de rugosidade Ra e Rq.



(a)



(b)

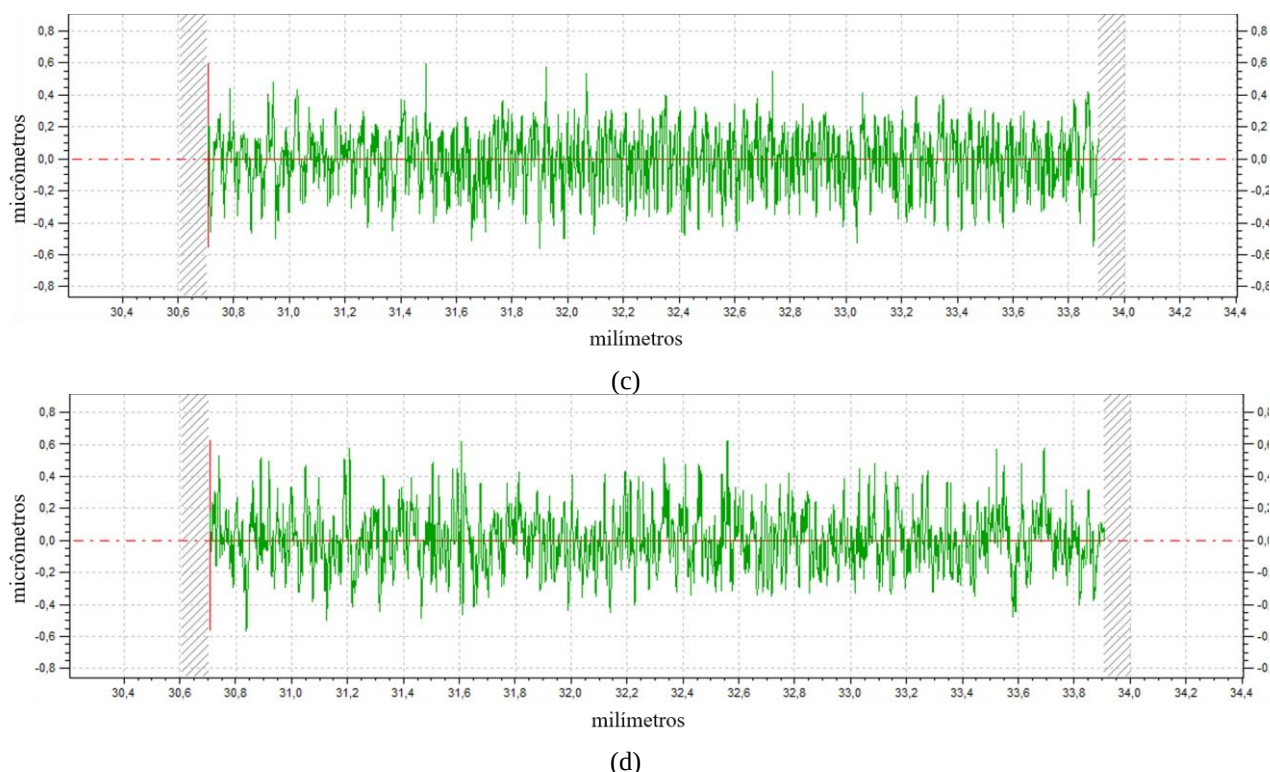


Figura 7 - Superfície dos canais 1 (a) e 9 (b), e perfil de rugosidade dos canais 1 (c) e 9 (d)

4. CONCLUSÕES

Ao analisar o comportamento do desgaste das microferramentas utilizadas percebeu-se que o comportamento foi semelhante ao desgaste das macroferramentas, nas quais a curva que representa o desgaste pode ser dividida em três estágios. Além disso, nota-se que o desgaste da microferramenta a cada microcanal fabricado é pequeno.

Com relação a análise da rugosidade superficial pode-se concluir que os valores obtidos para o R_a foram baixos, sendo comparáveis ou até menores do que a faixa estimada para peças retificadas. Sobre a análise do R_a e R_q pode-se observar que apresentaram comportamento semelhante, demonstrando que não existem picos ou vales que se destacam no perfil de rugosidade das superfícies usinadas.

3. AGRADECIMENTOS

Os autores expressam seus agradecimentos ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, às agências de fomento governamentais CNPq, CAPES e FAPEMIG pelo apoio financeiro e ao “Laboratório multiusuário de Microscopia” da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia. Agradecemos também à comissão organizadora do 11º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação.

4. REFERÊNCIAS

- Allegri, G., Colpani, A., Ginestra, P. S., Attanasio, A., 2019. “An experimental study on micro-milling of a medical grade Co-Cr-Mo alloy produced by selective laser melting”. *Materials*. Vol. 12, n. 13, p. 2208.
- Aramcharoen, A., Mativenga, P.T., Yang, S., Cooke, K.E., Teer, D.G., 2008. “Evaluation and selection of hard coatings for micro milling of hardened tool steel”. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. Vol. 48, p. 1578 – 1584.
- Boothroyd, G., 1989. *Fundamentals of machining and machine tools*. New York: Marcel Dekker, 2ª edição.
- Câmara, M. A., Rubio, J. C., Abrão, A. M., Davim, J. P., 2012. “State of the art on micromilling of materials, a review”. *Journal of Materials Science & Technology*. Vol. 28, n. 8, p. 673-685.
- Chae, J., Park, S. S., Freiheit, T., 2006. “Investigation of micro-cutting operations”. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. Vol. 46, n. 3, p. 313-332.
- Cheng, K. e Huo, D., 2013. *Micro-Cutting – Fundamentals and Applications*. Ed. Wiley, United Kingdom, 366p.
- Chua, C. K., Leong, K. F., Lim, C. S., 2003. *Rapid prototyping: principles and applications (with companion CD-ROM)*. World Scientific Publishing Company, 2ª edição.

- De Assis, C. L. F., Mecelis, G. R., Coelho, R. T., 2020. "An investigation of stainless steel 316L parts produced by powder bed fusion submitted to micro-endmilling operations". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. Vol. 109, n. 7, p. 1867-1880.
- De Oliveira Campos, F., Araujo, A. C., Munhoz, A. L. J., Kapoor, S. G., 2020. "The influence of additive manufacturing on the micromilling machinability of Ti6Al4V: A comparison of SLM and commercial workpieces". *Journal of Manufacturing Processes*. Vol. 60, p. 299-307.
- Diniz, A. E., Marcondes, F. C., Coppini, L.L., 2006. *Tecnologia da Usinagem dos Materiais*. São Paulo: Art. Liber, 4ª edição.
- Kumbhar, N. N. e Mulay, A. V., 2018. "Post processing methods used to improve surface finish of products which are manufactured by additive manufacturing technologies: a review". *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C*. Vol. 99, n. 4, p. 481-487.
- Lane, B. M., Moylan, S. P., Whittenton, E. P., 2015. "Post-process machining of additive manufactured stainless steel". In: *Proceedings of the 2015 ASPE Spring Topical Meeting: Achieving Precision Tolerances in Additive Manufacturing*. p. 27-29.
- Liu, K. e Melkote, S. N., 2007. "Finite element analysis of the influence of tool edge radius on size effect in orthogonal micro-cutting process". *International Journal of Mechanical Sciences*. Vol. 49, p. 650-660.
- Machado, A. R., Silva, M. B., Coelho, R.T. e Abrão, A.M., 2011. *Teoria da Usinagem dos Materiais*. 2a edição. São Paulo: Blucher.
- Masuzawa, T., 2000. "State of the art of micromachining". *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. Vol. 49, p. 473-488.
- Miranda-Giraldo, M., Serje-Martínez, D., Pacheco-Bolívar, J., Bris-Cabrera, J., 2017. "Burr formation and control for polymers micro-milling: A case study with vortex tube cooling". *Dyna*, Vol. 84, p. 150-159.
- Nematollahi, M., Jahadakbar, A., Mahtabi, M. J., Elahinia, M., 2019. "Additive manufacturing (AM)". In: *Metals for Biomedical Devices*. Woodhead Publishing. p. 331-353.
- Ng, C.K., Melkote, S.N., Rahman, M., Kumar, A. S., 2006. "Experimental study of micro- and nano-scale cutting of aluminum 7075-T6". *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. Vol. 46, n. 9, p. 929-936.
- Ribeiro, K.S.B., Mariani, F.E., Coelho, R.T., 2020. "A study of different deposition strategies in direct energy deposition (DED) processes". *Procedia Manufacturing*. Vol. 48, p. 663-670.
- Salonitis, K., D'Alvise, L., Schoinochoritis, B., Chantzis, D., 2016. "Additive manufacturing and post-processing simulation: laser cladding followed by high speed machining". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. Vol. 85, n. 9-12, p. 2401-2411.
- Vaezi, M., Seitz, H., Yang, S., 2013. "A review on 3D micro-additive manufacturing Technologies". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 67, n. 5-8, p. 1721-1754.
- VILLARES METALS, 2018. "Aços Inoxidáveis". 04 abr. de 2018
<<http://www.villaresmetals.com.br/villares/pt/Produtos/Acos-Inoxidaveis>>.

5. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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

EXPERIMENTAL STUDY OF THE MICROMACHINING OF STAINLESS STEEL 316L MANUFACTURED BY ADDITIONAL MANUFACTURING

Milla Caroline Gomes

Federal University of Uberlandia, Faculty of Mechanical Engineering, Campus Santa Mônica, Zip code 38408-100, Uberlandia-MG, Brazil.
millagomes150@gmail.com

Marcio Bacci da Silva

Federal University of Uberlandia, Faculty of Mechanical Engineering, Campus Santa Mônica, Zip code 38408-100, Uberlandia-MG, Brazil.
mbacci@ufu.br

Abstract. *Micromachining is an important manufacturing process that has been used in the post-processing of metal parts manufactured by the Additive Manufacturing process, improving surface roughness, and adding characteristics to these parts. With the increasing production of metal parts by additive manufacturing, better knowledge of their micromachining is necessary. Therefore, this work aims to investigate the micromachining of 316L stainless steel manufactured by Additive Manufacturing, through the Direct Energy Deposition (DED) process. In this investigation, the wear behavior of the microtool and the finish of the micromachined surface were evaluated, through the analysis of the Ra and Rq parameters. The wear of the microtool was measured by reducing the diameter of the microtool on the secondary clearance surface. The results obtained showed that in the wear behavior of the microtool it was possible to identify the three stages of wear, as shown in the wear of the macrotools. Also, it was possible to observe that the roughness values were small, ranging from 0.1140 μm to 0.1532 μm for Ra and that the parameters Ra and Rq showed similar behavior, demonstrating that there are no peaks or valleys that stand out in the machined surface.*

Keywords: *Micromachinig, Micromilling, Additive Manufacturing, Stainless Steel*

RESPONSIBILITY NOTICE

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