

INFLUÊNCIA DO AVANÇO POR DENTE NO MICROFRESAMENTO DO AÇO FERRAMENTA AISI H13

Thaise Alonso

Universidade Federal de Uberlândia - Av. João Naves de Ávila 2121 - Campus Santa Mônica - CX 593 - Uberlândia - MG - CEP 38408-100
thaise-alonso@hotmail.com

Márcio Bacci da Silva

Universidade Federal de Uberlândia - Av. João Naves de Ávila 2121 - Campus Santa Mônica - CX 593 - Uberlândia - MG - CEP 38408-100
mbacci@ufu.br

Resumo: O processo de microfresamento permite a fabricação de peças miniaturizadas e usinagem de microdetalhes em diversificadas áreas da engenharia. O processo é capaz de produzir superfícies complexas e com acabamento superficial que atende rigorosas exigências de qualidade. Entre as aplicações na indústria metal mecânica, destaca-se o microfresamento de aços ferramenta para fabricação de moldes e matrizes. Entretanto, o microfresamento aplicado à aços ferramenta é um desafio, em razão da curta vida da ferramenta. Assim, o estudo dos parâmetros de corte no processo de microfresamento é de grande importância para aliar vida de ferramenta e qualidade da superfície usinada. Desta forma, o presente trabalho investiga experimentalmente o efeito do avanço por dente na usinagem do aço ferramenta AISI H13 recozido durante o processo de microfresamento. Para isto, utilizou-se microfresas de topo reto de 400 μm de diâmetro, revestida de (Al, Ti) N. Os ensaios consistiram na usinagem de microcanaís utilizando uma microfresadora com rotação máxima do eixo árvore de 60000 rpm. Foram investigados o comportamento dos parâmetros de rugosidade R_a e R_q , a formação de rebarbas e o desgaste das microferramentas. O desgaste foi avaliado através de comparação de imagens obtidas no MEV das ferramentas usadas e novas. Os microcanaís usinados foram observados no MEV para análise visual da superfície usinada e das rebarbas formadas. Os resultados mostraram que as maiores rugosidades foram obtidas utilizando avanço por dente de 5,0 $\mu\text{m}/\text{volta}/\text{dente}$ e 10 $\mu\text{m}/\text{volta}/\text{dente}$. No entanto, um avanço por dente de 10,0 $\mu\text{m}/\text{volta}/\text{dente}$ resultou no menor desgaste da microfresa e, também se identificou para este parâmetro uma redução na formação de rebarbas. Observou-se que as rebarbas do lado concordante foram maiores do que as do lado discordante. Concluiu-se, então, que para maiores valores de avanço por dente, há uma menor tendência na formação de rebarbas, entretanto, a rugosidade superficial tende a aumentar, como esperado.

Palavras-chave: AISI H13, Microfresamento, Rugosidade Superficial, Desgaste de Ferramenta

1. INTRODUÇÃO

A microusinagem é um dos principais processos de manufatura que permite a fabricação de peças miniaturizadas e microdetalhes em grandes componentes. A miniaturização tem o desafio de produzir componentes cada vez menores, com redução de massa, menor consumo de energia e menos espaço. O microfresamento permite o desenvolvimento e a fabricação de microprodutos em diversos setores, como por exemplo os setores médicos, dispositivos eletrônicos, aeroespacial, automobilístico e biomédicos (Takacs; Vero; Mészáros, 2003; Venkatesh *et al.*, 2016).

Apesar de não existir uma classificação clara do que seria um processo de microusinagem, a definição utilizada por Câmara *et al.* (2012) talvez seja a melhor que representa o processo de microfresamento. Os autores definem o processo de microfresamento como uma operação na qual a ferramenta de corte possui dimensões entre 1 μm e 1000 μm .

Na microusinagem a relação peça-ferramenta apresenta um comportamento diferente em relação à usinagem em tamanho macro, devido à redução significativa das dimensões envolvidas (Chae *et al.*, 2006). Desta forma, é de grande importância estudar os fatores que afetam o microfresamento e apresentar soluções que melhoram o desempenho do processo (Bissacco *et al.*, 2005).

De acordo com Bissacco *et al.* (2005), os parâmetros de corte não podem se basear nos conhecimentos do fresamento convencional por conta dos chamado efeito o escala e da menor resistência das microfresas, sendo assim é de grande importância estudar os fatores que afetam o microfresamento e apresentar soluções que melhorem o desempenho do processo.

Apesar de reduzidas dimensões, as peças fabricadas por microusinagem necessitam de alta integridade na superfície, com tolerâncias dimensional e geométrica estreitas e precisas (Cheng e Huo, 2013). De maneira geral, os melhores

valores de rugosidade e acabamento são obtidos quando as flexões ocasionadas por esforços de usinagem ou vibrações são pequenas, o material da peça é puro e livre de defeitos (trincas, bolhas e inclusões), o eixo principal da máquina-ferramenta está corretamente alinhado e as guias não apresentam desgaste. Outro fator que pode influenciar o acabamento do material microfresado é a elasticidade do conjunto máquina-ferramenta-peça (Liu e Wang, 2009). Os parâmetros de processo também exercem forte influência sobre a rugosidade. O avanço é o que tem maior influência: a altura dos picos e a profundidade dos vales das marcas de avanço tendem a aumentar em proporção quadrática em relação ao avanço (Shaw, 1997). O incremento da velocidade de avanço aumenta as forças de usinagem e a amplitude das vibrações da ferramenta, tendendo a gerar maiores alturas das ondulações (Wentian e Yude, 2010), principalmente devido ao aumento no avanço por dente resultante.

Um dos materiais que mais têm sido utilizados nas últimas décadas são os aços ferramenta (Gabardo, 2008). Estes aços são bastante empregados na fabricação de matrizes, moldes e componentes de máquinas, seja para trabalho a quente ou a frio. São, provavelmente, alguns dos que mais exigem cuidados e atenção sob o ponto de vista de fabricação e aplicação, pois necessitam cumprir requisitos importantes para suprir as condições de serviço a que se destinam (CHIAVERINI, 1988). Devido a isso, o presente trabalho busca investigar experimentalmente o efeito do avanço por dente na usinabilidade do aço ferramenta AISI H13 recozido, no processo de microfresamento.

3. METODOLOGIA

O material escolhido para a realização dos testes de microfresamento foi o aço ferramenta AISI H13. Este material é empregado principalmente na fabricação de moldes e matrizes. Os aços ferramenta foram desenvolvidos para obter alta resistência a temperaturas elevadas, boa resistência à corrosão, alta dureza e boa resistência ao desgaste. No entanto, são materiais que apresentam reduzida usinabilidade.

O aço AISI H13 é um dos aços ferramenta da série H que possui alto teor de cromo. O aço AISI H13 é comumente aplicado em processos de trabalho a quente, como em matrizes e mandris de extrusão, em razão das suas características de alta dureza, resistência ao desgaste térmico, além de apresentar boa ductilidade, soldabilidade e usinabilidade. (Kattire, 2015; Bhushan, 1991; Gabardo, 2008). A dureza média do aço ferramenta AISI H13 utilizado neste trabalho é de 193,7 HBW e sua composição química está apresentada na Tab. (1):

Tabela 1. Composição química do aço AISI H13

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Co	Cu	V	W	As	Ca	B	N	Fe
0,3846	0,9105	0,3023	0,0168	0,0053	5,0942	1,2723	0,3158	0,0146	0,0166	0,0893	0,8518	0,0567	0,0166	0,0004	0,0005	0,0597	90,5643

A microestrutura foi obtida através de preparação da amostra com lixas de granulometria 220 mesh, 320 mesh, 600 mesh e 1200 mesh, e posteriormente polimento com óxido de alumínio (alumina) de 1 μm . A amostra foi então atacada por imersão durante 15 s em uma solução química de 10 % ácido nítrico (HN_3) e 90 % de álcool etílico ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$). Com o auxílio de um microscópio óptico e o software Image-Pro Plus, obteve-se a microestrutura do material, mostrada na Fig. 1,

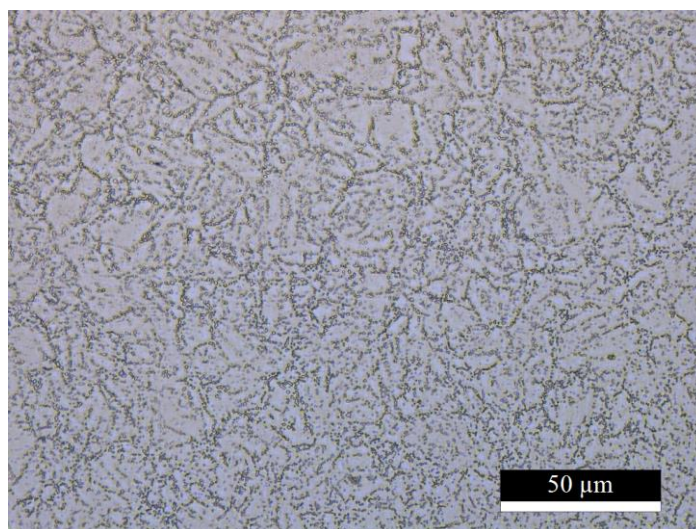


Figura 1. Microestrutura do Aço H13

Assim como observado por Gabardo (2008), nota-se na microestrutura do aço ferramenta H13 a presença de de uma matriz ferrítica (região mais clara) com uma grande quantidade de carbonetos esferoidizados, que são partículas escuras espalhadas por todo o material.

O microfresamento foi o processo usado na realização dos ensaios para a fabricação de microcanais. A microfresadora utilizada consiste em uma máquina-ferramenta modelo CNC Mini-mill/GX, do fabricante Minitex Machinery Corporation®. Esta máquina possui rotação do eixo árvore máxima de 60000 rpm, 3 eixos com resolução de posicionamento de 0,1 µm. A microfresadora está localizada sob uma mesa inercial, especialmente projetada para diminuir a influência de vibrações de fontes externas durante a realização da microusinagem.

Os ensaios consistiram em produzir microcanais utilizando microfresas de metal duro revestidas com (Al, Ti) N com diâmetro de 400 µm. Na Tab. 2 e a Fig. 2 são apresentados os parâmetros geométricos da ferramenta, de acordo com os dados fornecidos pelo fabricante. Os parâmetros de corte selecionados no processo são apresentados na Tab. 3. Foram produzidos 10 canais de 10 mm de comprimento cada, com espaçamento de 1 mm entre cada canal.

Tabela 2. Parâmetros Geométricos das Microferramentas (Mitsubishi Materials, 2022)

Parâmetros Geométricos	Microferramenta
Diâmetro de corte (DC)	0,4 mm $\begin{smallmatrix} 0,000 \\ -0,020 \end{smallmatrix}$
Profundidade de corte máxima (APMX)	0,8 mm
Comprimento da haste (LF)	40 mm
Diâmetro da haste (DCON)	4 mm
Ângulo de meia conicidade do corpo (BHTA)	15°
Arestas de Corte	02

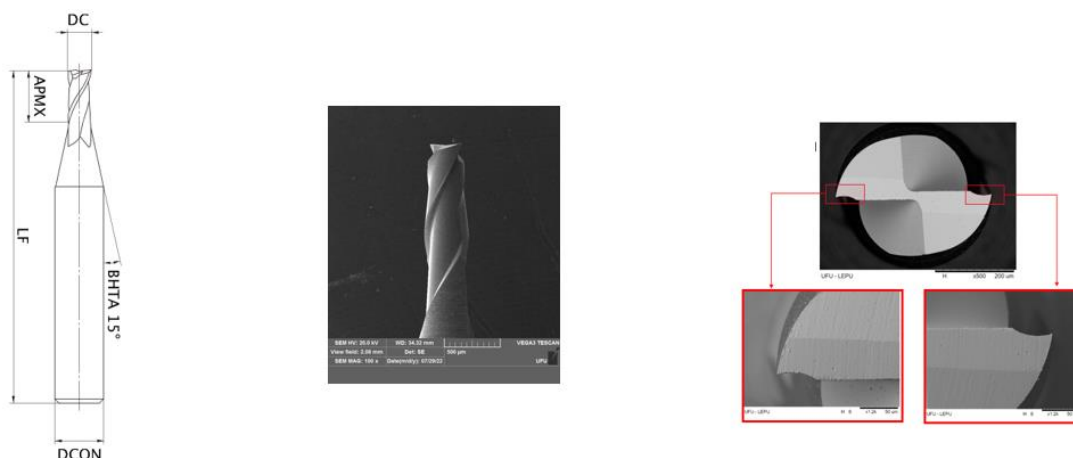


Figura 2. Parâmetros geométricos das microferramentas (Mitsubishi Materials, 2022)

Para assegurar a integridade das microferramentas, antes e após os testes, as ferramentas foram analisadas em um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), modelo HITACHI TM3000 do fabricante *Hitachi High-Technologies Corporation*®. Esta avaliação é importante para que exista controle da ferramenta antes e após a realização dos ensaios, além de assegurar que a qualidade da ferramenta se encontre

Tabela 3. Parâmetros de corte utilizados nos ensaios de microfresamento do aço ferramenta H13.

Teste	Velocidade de corte (m/min)	Rotação (rpm)	Profundidade de corte (µm)	Avanço por dente (µm)
1	40,2	32 000	40	1
2				5
3				10

Após o microfresamento, as superfícies usinadas e as microferramentas foram examinadas no MEV, com o objetivo de averiguar qualitativamente as diferenças entre as condições de corte utilizadas.

As medições da rugosidade superficial foram feitas utilizando um perfilômetro modelo Form Talysurf Intra do fabricante *Taylor Hobson®*, que possui resolução de 16 nm. O perfilômetro também está localizado sob uma mesa inercial, para diminuir a influência de vibrações externas durante a medição.

Para as análises de rugosidade foram considerados os parâmetros: rugosidade média (Ra) e rugosidade média quadrática (Rq). O parâmetro Ra abrange uma ampla quantidade de trabalhos de microfresamento, o que possibilita a comparação entre trabalhos. O parâmetro Rq indica a presença de picos e vales na superfície usinada. A medição foi realizada com a aplicação de um filtro primário de Gauss e cut-off de 0,8 mm. Três medições foram realizadas perpendicularmente as marcas de avanço por dente em cada canal usinado.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 RUGOSIDADE

As Figs. 4 e 6 mostram o comportamento das rugosidades Ra e Rq no comprimento usinado para cada condição de corte. As médias das rugosidades Ra e Rq em função do avanço por dente utilizado são mostradas nas Figs. 5 e 6. Foi calculado o desvio padrão para um nível de confiança de 95 %.

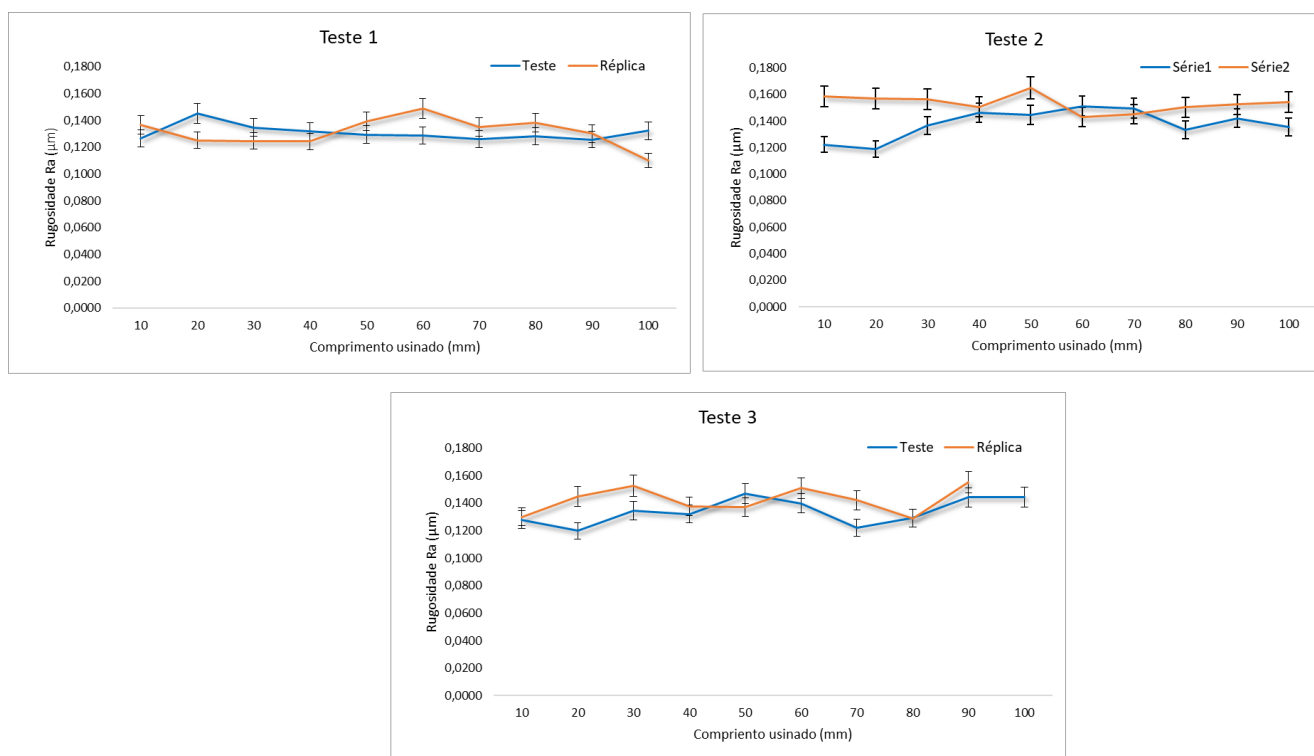


Figura 4. Variação da rugosidade Rq no comprimento usinado

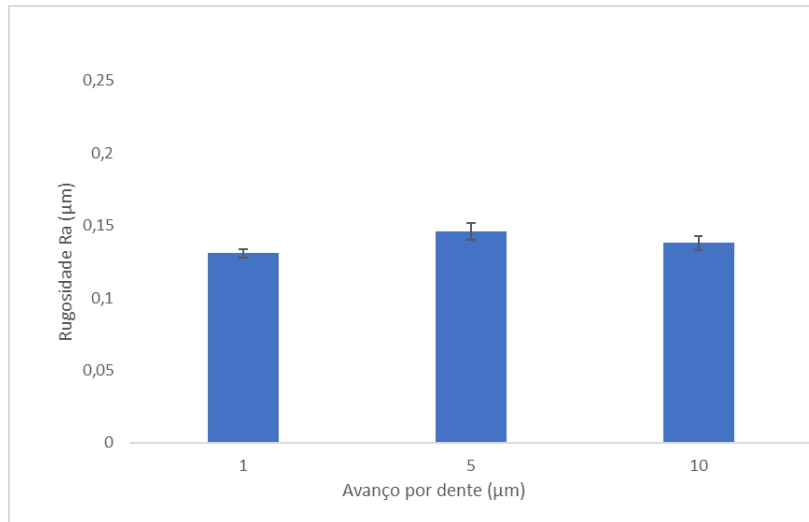


Figura 5. Influência da variação do avanço por dente na rugosidade Ra

A rugosidade Ra varia de 0,1100 μm a 0,1648 μm , dependendo das condições de corte empregadas. Ao analisar a Fig. 5 observa-se que para a condição de avanço por dente de 5 $\mu\text{m}/\text{dente}$ (Teste 2) tem-se as maiores médias de rugosidade Ra, 0,1457 μm . Os resultados para a condição de avanço por dente de 1 $\mu\text{m}/\text{dente}$ (Teste 1) e 10 $\mu\text{m}/\text{dente}$ (Teste 3) foram 10,23 % e 5,36 % menores que o Teste 2, respectivamente, com rugosidade superficial média de 0,1308 μm e 0,1379 μm .

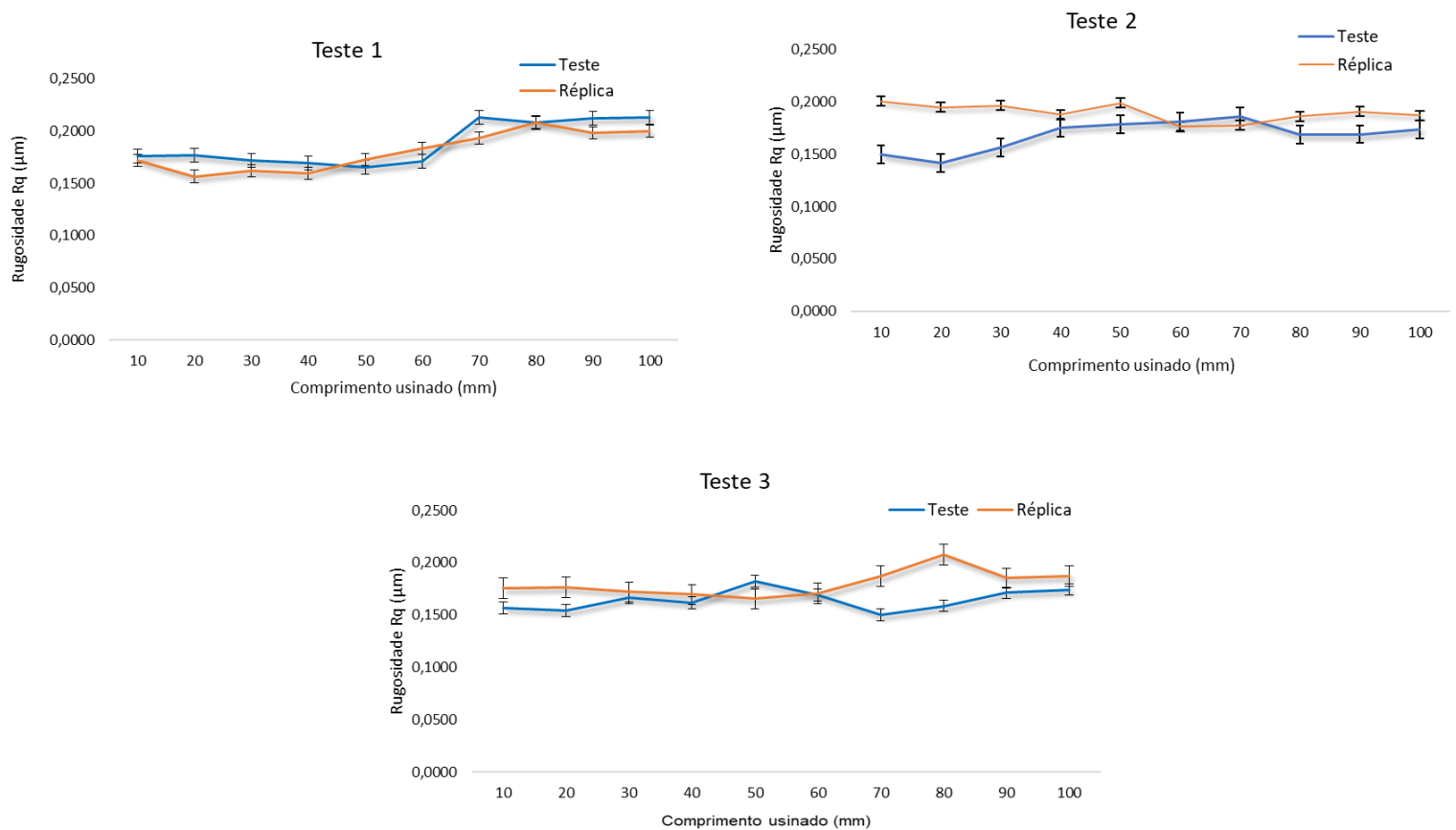


Figura 6. Variação da rugosidade Rq no comprimento usinado

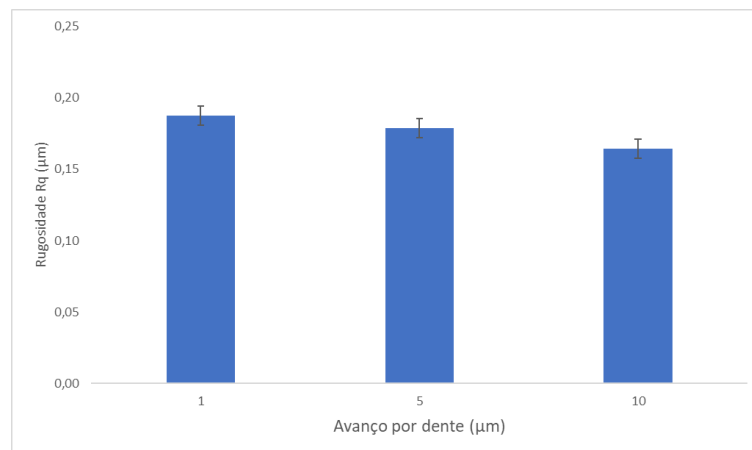


Figura 7. Influência da variação do avanço por dente na rugosidade Rq

Para o parâmetro de rugosidade Rq, o Teste 3 apresentou o menor resultado, com 0,1645 µm. O Teste 1 e o Teste 2 foram, em média, 0,1875 µm. e 0,1788 µm, sendo 14,99 % e 8,69 % maiores que o resultado obtido no Teste 3. O parâmetro Rq é mais sensível a variações da superfície, sendo possível identificar irregularidades (picos e vales) nos perfis.

4.2 REBARBAS

Para melhor compreensão dos resultados da superfície usinada, são apresentadas imagens do MEV dos canais 1, 5 e 10 para os testes em análise. Vale ressaltar que o comportamento da superfície usinada nos 10 canais apresentaram características similares nos testes e nas réplicas e, por este motivo foram selecionadas somente 3 imagens, conforme a Fig. 7.

Segundo Aramcharoen (2009) e Liu (2004), era esperado que a rugosidade superficial aumentasse com o aumento do avanço por dente, além de aumentar quando se reduz o avanço, por causa da recuperação elástica e a espessura mínima de corte. Visivelmente é possível notar que as marcas de avanço deixadas pela microferramentas para os Teste 1 e 2 são mais evidentes e apresentam aspectos semelhantes a presença de vibração no fundo do canal, não apresentando, o comportamento esperado.

Na microusinagem, a formação de rebarbas é um problema, visto que apresentam grandes dimensões quando comparada com os parâmetros de corte do processo: avanço e profundidade de corte. A dimensão relativa das rebarbas de topo são mais significativas.

Tanto no início do corte (fresamento discordante) quanto no final do corte (fresamento concordante) percebe-se uma tendência no aumento das rebarbas com o comprimento usinado. O Teste 1 apresentou rebarbas do tipo onda em grande parte do comprimento no lado do fresamento concordante. No Teste 2 e 3 predominou rebarbas do tipo menores, com rebarbas primárias, principalmente no lado do fresamento concordante.

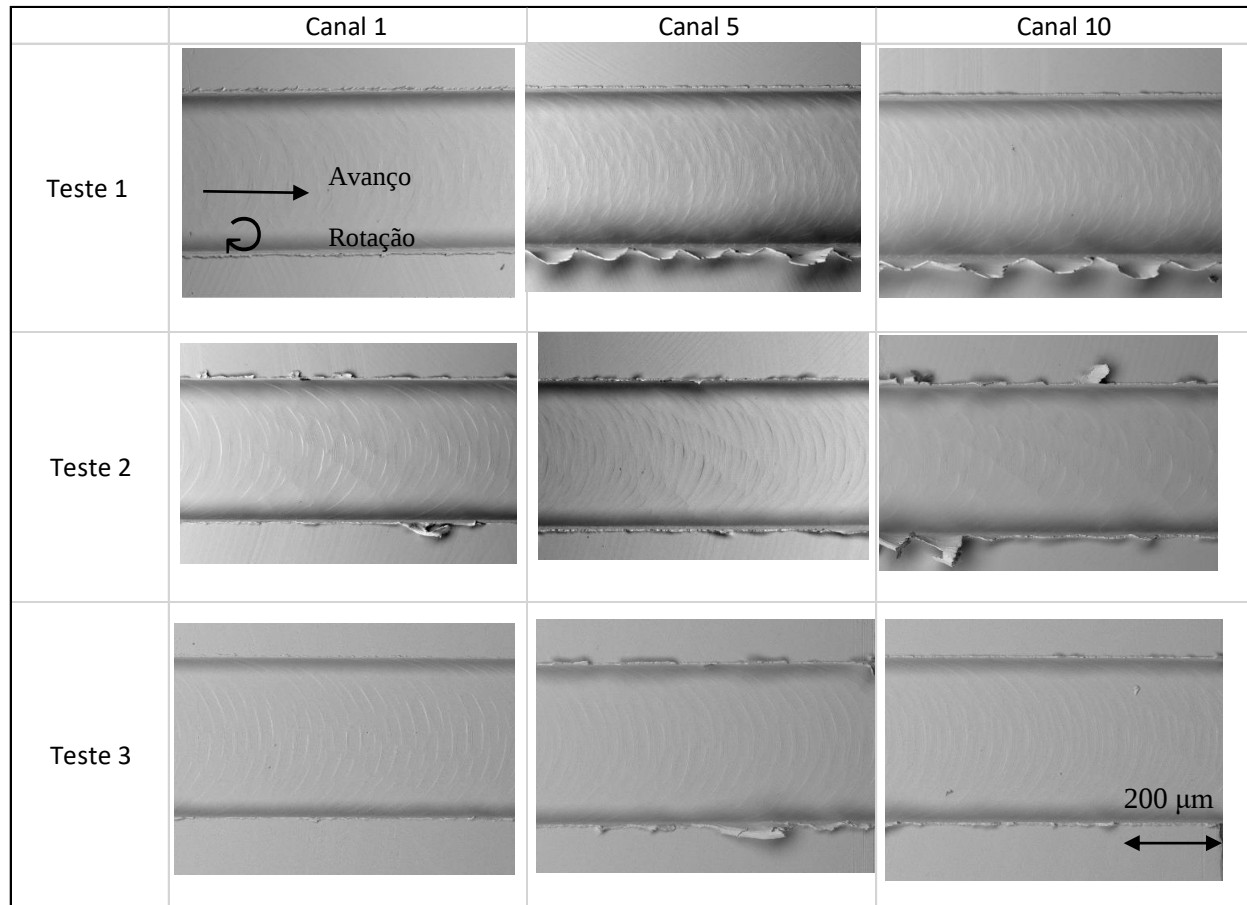


Figura 8 – Fotos das rebarbas e da superfície dos canais usinados

4.2 DESGASTE DAS MICROFERRAMENTAS

A Fig. 8 apresenta o percentual de redução do diâmetro das microferramentas após os 100 mm de comprimento usinado, calculados a partir das imagens da superfície secundária de folga antes e depois da usinagem, que são mostradas na Fig. 9:

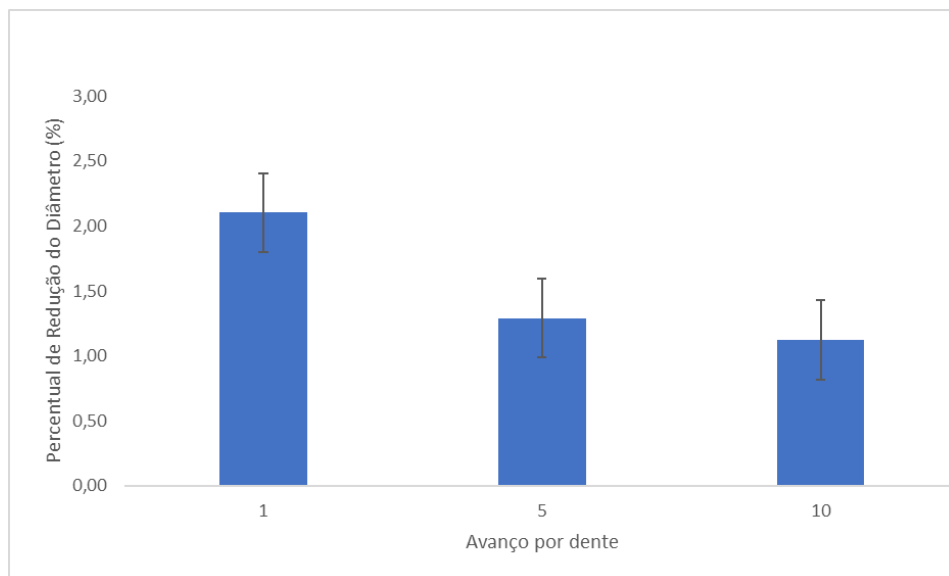
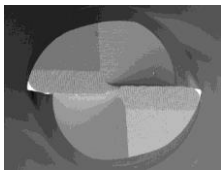
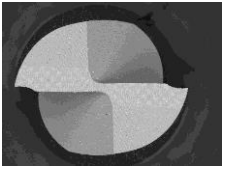
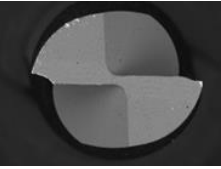


Figura 9. Percentual de Redução do Diâmetro

Teste	Ferramenta	Nova	Desgastada
1	1.1		
	1.2		
2	2.1		
	2.2		

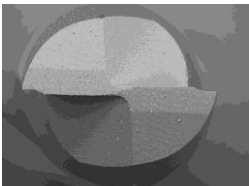
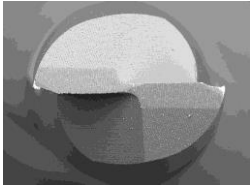
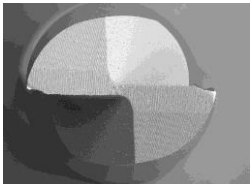
3	3.1		
	3.2		

Figura 10. Superfície Secundária de Folga das microferramentas

O maior desgaste foi obtido para o Teste 1. A redução do diâmetro foi em média 2,10 %. Percebe-se o arredondamento de ponta na aresta de corte e perda do revestimento, Fig. 9.

Aslantas *et al.* (2016), ressalta que a diminuição do raio de aresta melhora a rugosidade superficial, entretanto ao utilizar ferramentas com revestimentos desgastado pode-se ocasionar o arredondamento da aresta de corte, como é possível identificar na Ferramenta utilizada no Teste1 (ferramenta 1.1), mostrada na Fig. 10:

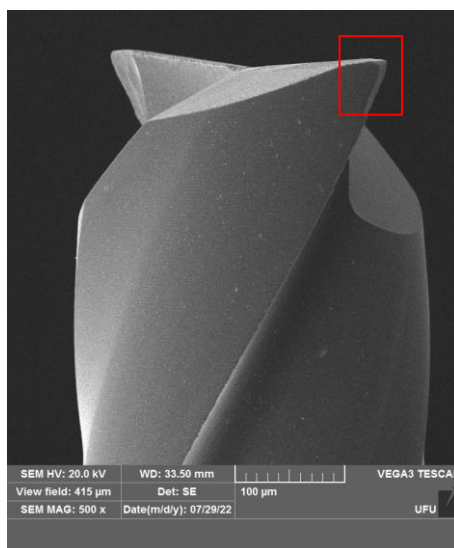


Figura 11 – Arredondamento do raio de aresta da Ferramenta 1.1

A ferramenta utilizada no Teste 2 apresentou redução média de 1,29 % no valor do diâmetro em relação à medição inicial. Ainda é possível observar deformação da aresta de corte na réplica. A ferramenta utilizada no Teste 3 apresentou o menor desgaste. Para esta condição a redução do diâmetro foi em média de 1,12 %.

5. CONCLUSÃO

Após a realização dos ensaios e análise dos resultados, pode-se observar que o resultado de rugosidades obtidos utilizando avanço de 5 µm/dente e 10 µm/dente não apresentaram diferenças estatísticas. No avanço por dente de 10,0 µm/dente resultou no menor desgaste da microferramentas e, também se identificou para este parâmetro uma redução na formação de rebarbas. Observou-se que para todos os parâmetros investigados as rebarbas do lado concordante foram maiores do que as do lado discordante. Concluiu-se, então, que para maiores valores de avanço por dente, há uma menor tendência na formação rebarbas, entretanto, a rugosidade superficial tende a aumentar.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia e às agências de fomento governamentais CNPq, CAPES e FAPEMIG pelo suporte financeiro. Agradecemos também à comissão organizadora do 12º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação.

7. REFERÊNCIAS

- Aramcharoen, A. e Mativenga, P. T., 2009. Size effect and tool geometry in micromilling of tool steel. *Precision Engineering*.
- Arruda, É. M., *et al.*, 2019. Robust optimisation of surface roughness of AISI H13 hardened steel in the finishing milling using ball nose end mills. *Precision Engineering*.
- Aslantas, K., *et al.*, 2016. Cutting performance of nano-crystalline diamond (NCD) coating in micro-milling of Ti6Al4V alloy. *Precision Engineering*.
- ASM International., 2005. Properties and Selection: irons, steels, and highperformance alloys. *Asm International*. Estados Unidos.
- Bhushan, B. e Gupta, B. K., 1991. Handbook of tribology: materials, coatings, and surface treatments.
- Bissacco, G., *et al.*, 2005. Micromilling of hardened tool steel for mould making applications. *Journal of Materials Processing Technology*.
- Câmara, M. A., *et al.*, 2012., State of the art on micromilling of materials, a review. *Journal of Materials Science & Technology*, Vol. 28(8), p. 673-685
- Chae, J., *et al.*, 2006. Investigation of micro-cutting operations. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 46(3-4), p. 313-332.
- Chen, N., *et al.*, 2021. Advances in micro milling: From tool fabrication to process outcomes. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*.
- Chiaverini, V., 1988. Aços e Ferros Fundidos. São Paulo: ABM.
- Gabardo, J. F., 2008. *Estudo da tenacidade do aço ferramenta H13*. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Paraná. Brasil.
- Huo, D., 2013. Micro-cutting: fundamentals and applications. *John Wiley & Sons*.
- Kattire, P., *et al.*, 2015. Experimental characterization of laser cladding of CPM 9V on H13 tool steel for die repair applications. *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 20, p. 492-499
- Machado, A., *et al.*, 2011. Teoria da Usinagem dos Materiais. *Edgard Blucher*, São Paulo
- Minitex Machinery., 2022. The Gx Granite Base Super Precision. Disponível em: <<https://MinitexMitsubishiMaterials>>
- Ramanath, S., Ramaraj T.C. e Shaw M.C., 1987. What grinding swarf reveals, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 36 (1), p. 245-247.
- Takacs, M., Verö, B. e Meszaros, I., 2003. Micromilling of metallic materials. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol 138(1-3), p. 152-155.
- Venkatesh, V., *et al.*, 2017. Review on the machining characteristics and research prospects of conventional microscale machining operations. *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 32(3), p. 235-262.
- Wentian, S., e Yude, L., 2010. Notice of retraction: fabrication of micro gear based on micro-milling. *International Conference on Computer, Mechatronics, Control and Electronic Engineering*. Vol. 2, p. 608-611.

8. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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

INFLUENCE FEED RATE ON MICRO-MILLING OF AISI H13 TOOL STEEL

Thaise Alonso

Federal University of Uberlandia - Av. João Naves de Ávila 2121 - Campus Santa Mônica - CX 593 - Uberlândia - MG - CEP 38408-100

thaise-alonso@hotmail.com

Samuel Alves de Freitas

Federal University of Uberlandia - Av. João Naves de Ávila 2121 - Campus Santa Mônica - CX 593 - Uberlândia - MG - CEP 38408-100

samuelengmec@gmail.com

Arthur Vieira

Federal University of Uberlandia - Av. João Naves de Ávila 2121 - Campus Santa Mônica - CX 593 - Uberlândia - MG - CEP 38408-100

arthurvieira@ufu.br

Tamires Isabela Mesquita Botelho

Federal University of Uberlandia - Av. João Naves de Ávila 2121 - Campus Santa Mônica - CX 593 - Uberlândia - MG - CEP 38408-100

tamiresisabela@yahoo.com.br

Márcio Bacci da Silva

Federal University of Uberlandia - Av. João Naves de Ávila 2121 - Campus Santa Mônica - CX 593 - Uberlândia - MG - CEP 38408-100

mbacci@ufu.br

Abstract. *The micro milling process allows the manufacture of miniaturized parts and machining of micro details in different areas of engineering. The process can produce complex surfaces with a surface finish that meets strict quality requirements. Among the applications in the metalworking industry, the micro milling of tool steels for the manufacture of molds and dies stands out. However, micro milling applied to tool steels is a challenge, mainly due to the short tool life. Thus, the study of cutting parameters in the micro milling process is of great importance to combine tool life and machined surface quality. Thus, the present work experimentally investigates the effect of the feed per tooth in the machining of annealed AISI H13 tool steel during the micro milling process. For this, micro-milling with a straight top of 400 μm in diameter, coated with (Al, Ti) N was used. The tests consisted of machining micro-channels using a micro-milling machine with maximum spindle rotation of 60,000 rpm. The behavior of the roughness parameters Ra and Rq, the formation of burrs and the wear of the microtools were investigated. Wear was evaluated by comparing images obtained from MEV of used and new tools. The machined microchannels were observed in the MEV for visual analysis of the machined surface and the formed burrs. The results showed that the highest roughness was obtained using feed per tooth of 5.0 $\mu\text{m}/\text{turn}/\text{tooth}$ and 10 $\mu\text{m}/\text{turn}/\text{tooth}$. However, a feed per tooth of 10.0 $\mu\text{m}/\text{turn}/\text{tooth}$ resulted in less wear on the micro milling cutter, and a reduction in burr formation was also identified for this parameter. It was observed that the burrs on the concordant side were larger than those on the discordant side. It was concluded, then, that for higher values of feed per tooth, there is a smaller tendency in burr formation, however, the surface roughness tends to increase, as expected.*

Keywords: AISI H13, Micro milling, Surface Roughness, Tool Wear

RESPONSIBILITY NOTICE

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