

2019
São Carlos - SP



10º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação
05 a 07 de agosto de 2019, São Carlos, SP, Brasil

INVESTIGAÇÃO DO DESGASTE DE FERRAMENTA EM MICROFRESAMENTO DE TOPO DE AÇO FERRAMENTA H13

Cíntia Soares Manso

Erik Gustavo Del Conte

Universidade Federal do ABC, UFABC - Av. dos Estados, 5001 - Bangú, Santo André - SP
cinthia.manso@aluno.ufabc.edu.br
erik.conte@ufabc.edu.br

Cleiton Lazaro Fazolo de Assis

Instituto Federal de São Paulo, IFSP - Campus Votuporanga - Av. Jerônimo Figueira da Costa, 3014 - Pozzobon, Votuporanga - SP
fazolocla@ifsp.edu.br

Resumo. No processo de microfresamento, o desgaste acelerado e quebra prematura de ferramentas configuram um problema que afeta os custos e qualidade da usinagem. Este trabalho investiga o efeito do avanço por dente e do comprimento de corte na microusinagem a seco do aço ferramenta H13 (X40CrMoV5-1). A taxa de rotação do eixo-árvore foi mantida constante (27200 rpm) bem como a profundidade de corte (30 μm) e dois níveis de avanço por dente foram aplicados (1,5 e 3,0 μm), e três comprimentos de corte (316, 632 e 948 mm). O desgaste foi medido no topo da ferramenta baseado em uma metodologia proposta de mensuração da área de desgaste observada em imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura. Um modelo de regressão linear é proposto para prever o desgaste nas condições de usinagem estudadas. Um balanceamento entre os parâmetros de corte e o comprimento de corte deve ser realizado levando em consideração o desgaste de ferramenta em ordem de manter requisitos de qualidade e geometria da usinagem.

Palavras chave: Microfresamento. Desgaste de ferramenta. Parâmetros de corte.

1. INTRODUÇÃO

Microcomponentes são requeridos para várias aplicações industriais, incluindo a indústria eletrônica, óptica, aeroespacial, médica, biotecnologia, entre outras. Tecnologias de micromanufatura como o microfresamento, microusinagem por descarga elétrica e microusinagem a laser emergiram para satisfazer tais demandas (Kuram e Ozcelik, 2014), (Teng, *et al.*, 2018).

A habilidade do microfresamento de trabalhar com uma variedade de materiais e geometrias complexas faz deste processo um dos melhores para produção em microescala (Kuram e Ozcelik, 2014). O microfresamento é caracterizado pelo uso de ferramentas com o diâmetro menor que 1 mm (Özel, *et al.*, 2017) e difere em vários aspectos do fresamento convencional devido a características como a espessura mínima de cavaco, efeito de escala, recuperação elástica e mecanismo de ploughing. Ainda, devido ao diâmetro reduzido, as microfresas são muito frágeis e podem facilmente quebrar devido a deflexões excessivas, forças e vibrações (Kuram e Ozcelik, 2014).

O tempo de vida imprevisível e a falha prematura de ferramenta são reconhecidos como grandes problemas em microusinagem (Tansel, *et al.*, 1998). Entretanto, o número de estudos focados em desgaste de ferramenta em microfresamento ainda é limitado (Oliaei e Karpat, 2016). É importante entender as interações entre desgaste de ferramenta, forças de corte, deflexões e rugosidade da superfície usinada para manter os requisitos de qualidade (Oliaei e Karpat, 2016).

O desgaste gradual causa alteração da geometria, redução da eficiência de corte, aceleração do desgaste e perda da afiação da ferramenta (Groover, 2010). O desgaste afeta a acurácia e rugosidade da superfície usinada, aumenta as forças de corte, vibrações e formação de rebarbas (Uriarte, *et al.*, 2008), (Biermann e Baschin, 2009).

Os parâmetros de corte têm grande importância no desgaste de ferramenta e qualidade superficial da peça de trabalho. O avanço por dente é o que mais afeta a rugosidade (Bian, *et al.*, 2017) e também o desgaste de ferramenta (Ucun, *et al.*, 2013). Kiswanto *et al.* (2015) relataram que taxas de avanço mais baixas produzem superfícies menos rugosas mas aumentam o tempo de usinagem. Mensurar o desgaste de ferramenta em microfresamento é desafiador devido ao pequeno tamanho das ferramentas. Um critério confiável de avaliação da aresta de corte das microfresas ainda não foi estabelecido. Monitorar o diâmetro efetivo da ferramenta e o desgaste de flanco são métodos utilizados atualmente (Oliaei e Karpat, 2016). Teng *et al.* (2018) observou como sendo o principal mecanismo de desgaste de ferramenta no microfresamento de nanocompósitos de uma matriz metálica de Mg/Ti a delaminação do revestimento da

ferramenta (Teng et al. 2018). Zhu e Yu (2017) realizaram um estudo de desgaste em microfresamento baseado na área de desgaste das microfresas por análise de imagens. Os resultados indicaram que este tipo de abordagem generaliza a estimativa de desgaste de ferramenta e alcança resultados mais acurados (Zhu & Yu 2017).

Este trabalho avalia o efeito dos parâmetros avanço por dente (f_z) e o comprimento de corte (l_c) no desgaste de ferramentas na microusinagem de aço-ferramenta H13 (X40CrMoV5-1) e propõe uma abordagem nova para avaliação do desgaste.

2. METODOLOGIA

Foi realizado o fresamento a seco de microcanais usando um centro de ultra precisão Kern Evo®. O parâmetro de corte avaliado foi o avanço por dente ao longo do comprimento de corte. A velocidade de rotação do eixo-árvore e a profundidade foram mantidos constantes. A Tabela 1 apresenta os parâmetros de corte aplicados.

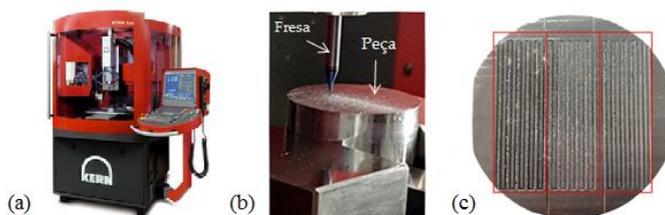
Tabela 1. Parâmetros de corte aplicados nos ensaios experimentais.

Parâmetro de corte	Ferramenta A	Ferramenta B
Velocidade de rotação [rpm]	27200	27200
Avanço por dente [μm]	3.0	1.5
Profundidade de corte [μm]	30	30
Comprimento de corte [mm]	316, 632 e 948	316, 632 e 948

Foram utilizadas microfresas de topo com dois dentes e 400 μm de diâmetro, feitas de carboneto de tungstênio revestidas de TiAlN, modelo AFH50526-004A TIA70 da Arno®. O ângulo de hélice é de 30° e o raio da aresta de corte foi avaliado em 2,5 μm . A espessura mínima de cavaco é estimada entre 1/4 e 1/3 do valor do raio da aresta de corte (Oliveira, 2015); de modo que os valores de taxa de avanço selecionados superaram o valor estimado de espessura mínima de cavaco, promovendo o mecanismo de remoção predominante no corte de cisalhamento.

Duas amostras de H13 foram usinadas, uma ferramenta nova foi utilizada em cada amostra. O experimento foi repetido três vezes com as mesmas ferramentas, e o desgaste observado ao final de cada usinagem, de modo que o comprimento de corte total performado com cada ferramenta foi de 948 mm (3x316). A Figura 1 mostra em (a) a máquina-ferramenta utilizada nos ensaios, em (b) o set-up experimental, onde a peça está fixada no centro de usinagem e em (c) uma amostra após as 3 usinagens: cada retângulo vermelho é uma usinagem de 316 mm de comprimento.

Figura 1. (a) Máquina-ferramenta, (b) set-up experimental e (c) Amostra de H13 usinada.



Imagens das ferramentas foram feitas em um microscópio eletrônico de varredura (MEV) da Jeol®, modelo JCM-6000 antes e após cada usinagem para obter o desgaste gradual. As ferramentas eram removidas da máquina entre as usinagens para essa avaliação. O software ImageJ® foi utilizado para o processamento das imagens.

Os resultados obtidos foram analisados estatisticamente com auxílio do *software* Action Stat, que funciona como suplemento para o Excel. Um modelo de regressão linear foi ajustado para os dados.

3. RESULTADOS

A Figura 2 apresenta em (a) a vista de topo de uma ferramenta nova e em (b) de uma ferramenta usada. É possível perceber que o desgaste ocorre na ponta da ferramenta, expandindo-se para o centro. As Figuras 2 (c) e (d) são ampliações de cada um dos dentes da ferramenta.

Foi proposto um método para avaliação de desgaste baseado na área de desgaste da ferramenta quando vista de topo. A área de desgaste foi delineada em branco (Fig. 2 (c) e (d)), mensurada e utilizada como indicativo de desgaste de ferramenta. Cada medida foi repetida 3 vezes; a média foi utilizada e o desvio padrão foi inferior a 3% em todas as medidas. A Tabela 2 apresenta estes valores.

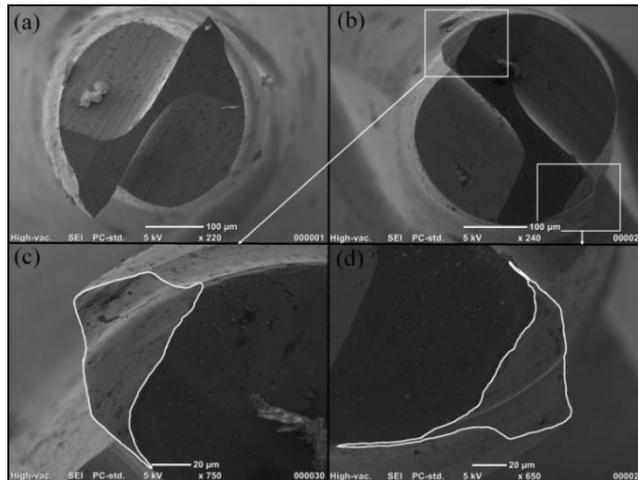


Figura 2. (a) Ferramenta nova, (b) ferramenta usada, (c) e (d) Desgaste de área na ferramenta B após usinagem de 948 mm de comprimento de corte.

Tabela 2. Evolução da área de desgaste pelo comprimento de corte.

Desgaste de Área (μm^2)			
Ferramenta	C1	C2	C3
A – Dente 1	364	1268	1868
A – Dente 2	478	1370	2645
B – Dente 1	917	2656	3101
B – Dente 2	542	1680	3009

Legenda: C1 = comprimento de corte de 316 mm, C2 = comprimento de corte de 632 mm e C3 = comprimento de corte de 948 mm.

O valor médio de desgaste de área entre os dentes foi calculado e o valor médio final de desgaste foi usado para verificar a existência de correlação entre a variável avanço por dente no desgaste de área de ferramenta. Assim, foi calculado o coeficiente de correlação de Pearson igual a -0.8220 ; que indica forte correlação negativa entre as variáveis avanço por dente e desgaste de ferramenta.

Também foi verificada a correlação entre o desgaste e o comprimento de corte. O coeficiente de correlação de Pearson calculado foi de 0.9236 ; indicando forte correlação positiva entre as variáveis.

Um modelo de regressão múltipla que pudesse ser aplicado ao intervalo de taxas de avanço utilizadas para diferentes comprimentos de corte foi calculado utilizando os valores médios de desgaste de área entre arestas.

A análise dos resíduos do modelo gerado identificou o ponto com taxa de avanço $f_z = 1,5 \mu\text{m}/\text{dente}$ e com comprimento de corte $l_c = 313 \text{ mm}$ como outlier; esse modelo preliminar apresentou desvio padrão médio dos resíduos de $133 \mu\text{m}^2$. Um novo modelo foi gerado com a exclusão deste ponto, de modo que o desvio padrão médio dos resíduos foi reduzido para $14 \mu\text{m}^2$. A seguinte tabela de análise de variância ANOVA foi obtida para os dados:

Tabela 3. Tabela da ANOVA

Fatores	G.L.	Soma de quadrados	Quadrado médio	Estat. F	p-valor
f_z	1	1964032	1964032	5487,7	0.000182
l_c	1	2077458	2077458	5804,6	0.000172
resíduos	2	715	358		

Analisando a Tabela da Anova conclui-se que as variáveis avanço por dente e comprimento de corte são significativas para o modelo uma vez que o p-valor para os dois coeficientes foram menores do que o nível de significância $\alpha = 0,05$.

As duas variáveis foram então utilizadas para compor o modelo de regressão múltipla, obtido com o software Action Stat, apresentado na Eq.(1).

$$D_A = -548f_z + 2,9l_c + 1155 \quad (1)$$

Onde D_A é o desgaste de área.

Foi realizada a análise dos resíduos para verificar se o modelo é apropriado. Os resíduos devem atender as seguintes suposições:

- (i) Os resíduos são independentes;
- (ii) A variância dos resíduos é constante;
- (iii) A distribuição dos resíduos é normal;
- (iv) O modelo é linear;
- (v) Não existem outliers influentes.

Foi obtido um p-valor para o teste de auto correlação de 0.5676 Durbin Watson. Adotando um nível de significância de 0,05, tem-se que os resíduos são independentes.

Para verificar a suposição (ii) foi plotado o gráfico dos resíduos pelos valores ajustados, mostrado na Fig. 4 (a). Observa-se que os resíduos são aleatoriamente distribuídos e, portanto, tem variância constante. A normalidade dos resíduos é verificada pelo gráfico dos resíduos versus quantis normais teóricos da distribuição normal padrão (Fig. 4 (b)). Os pontos alinhados à reta que representa a identidade dos quantis indicam normalidade dos resíduos.

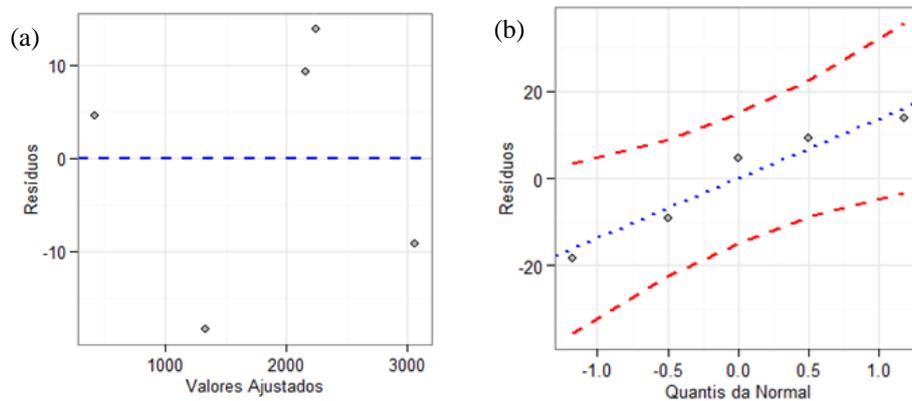


Figura 4. Distribuição dos resíduos pelos valores ajustados.

O coeficiente de determinação R^2 do modelo calculado é de 0,9998 indicando bom ajuste linear e validando a suposição (iv).

A análise de outliers foi feita pelo teste de outliers de Bonferroni. Foi detectado apenas um possível outlier e o p-valor de Bonferroni calculado para este ponto foi de 0,2473 que é maior que o nível de significância $\alpha = 0,05$ e portanto a hipótese nula de que o ponto não é um outlier é aceita.

A superfície de respostas obtida para o modelo é apresentada na Fig. 6.

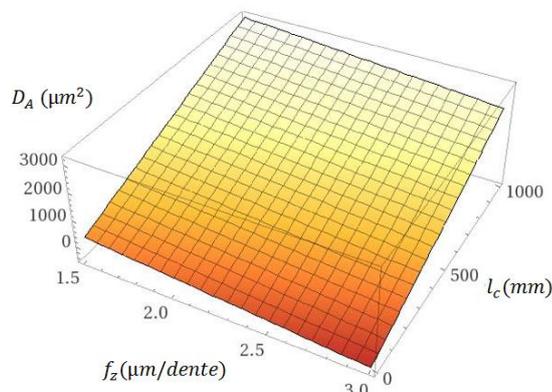


Figura 6. Superfície de respostas para o desgaste de área de ferramenta em função da taxa de avanço f_z e o comprimento de corte l_c .

4. CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta um estudo sobre a influência da taxa de avanço por dente e comprimento de corte no desgaste de ferramenta em microfresamento de aço-ferramenta H13. Foi concluído que baixas taxas de avanços implicam maior desgaste de ferramenta e que o desgaste aumenta com o aumento do comprimento de corte e pode ser modelado com boa aproximação linear. Foi proposto um método para avaliação de desgaste de ferramenta baseado na sua área de desgaste. O método de mensuração de desgaste por área foi considerado eficiente uma vez que apresentou forte correlação com a taxa de avanço, e reflete melhor a condição da ferramenta do que considerar apenas o desgaste de flanco. Um modelo de regressão linear múltipla foi calculado e validado para os parâmetros e condições de corte aqui especificados.

Novos trabalhos estão em desenvolvimento para avaliar a influência de outros parâmetros de corte no desgaste de ferramenta, outras técnicas de avaliação de desgaste e formação de rebarbas.

5. AGRADECIMENTOS

"O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. Agradecemos à equipe do laboratório de bionanomanufatura do IPT pelo suporte aos experimentos e ao laboratório de Processamento de Metais e Cerâmicas da UFABC.

5. REFERÊNCIAS

BIAN, R. et al. A study on the tool wear of PCD micro end mills in ductile milling of ZrO₂ ceramics. *Int J Adv Manuf Technol*, v. 92, p. 2197–2206, 2017.

BIERMANN, D.; BASCHIN, A. Influence of cutting edge geometry and cutting edge radius on the stability of micromilling processes. *Prod. Eng. Res. Devel.*, v. 3, p. 375–380, 2009.

GROOVER, M. P. *Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes and Systems*. 4th. ed. [s.l.] John Wiley & Sons, 2010.

KISWANTO, G.; ZARIATIN, D. L.; KO, T. J. The effect of spindle speed, feed-rate and machining time to the surface roughness and burr formation of Aluminum Alloy 1100 in micro-milling operation. *Journal of Manufacturing Processes*, v. 16, p. 435–450, 2014.

KURAM, E.; OZCELIK, B. Micro Milling. In: DAVIM, J. P. (Ed.). *Modern Mechanical Engineering - Materials Forming, Machining and Tribology*. Aveiro: Springer International Publishing, 2014. p. 325–466.

OLIAEI, S. N. B.; KARPAT, I. Influence of tool wear on machining forces and tool deflections during micro milling. *Int J Adv Manuf Technol*, v. 84, n. 9-12, p. 1963–1980, 2016.

OLIVEIRA, F. B. DE et al. Size effect and minimum chip thickness in micromilling. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, v. 89, p. 39–54, 2015.

ÖZEL, T.; OLLEAK, A.; THEPSONTHI, T. Micro milling of titanium alloy Ti-6Al-4V: 3-D finite element modeling for prediction of chip flow and burr formation. *Prod. Eng. Res. Devel.*, v. 11, p. 435–444, 2017.

TANSEL, I. et al. Micro-end-milling — I. Wear and breakage. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, v. 38, n. November 1997, p. 1419–1436, 1998.

TENG, X. et al. An experimental study on tool wear behaviour in micro milling of nano Mg / Ti metal matrix composites. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 96, p. 2127–2140, 2018.

UCUN, I.; ASLANTAS, K.; BEDIR, F. An experimental investigation of the effect of coating material on tool wear in micro milling of Inconel 718 super alloy. *Wear journal*, v. 300, p. 8–19, 2013.

URIARTE, L. et al. Mechanistic modelling of the micro end milling operation. *Journal of Engineering manufacture*, v. 222, n. 1, p. 23–34, 2008.

5. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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

INVESTIGATION ON TOOL WEAR IN MICRO END-MILLING OF TOOL STEEL H13

Cíntia Soares Manso

Erik Gustavo Del Conte

Universidade Federal do ABC, UFABC - Av. dos Estados, 5001 - Bangú, Santo André - SP

cinthia.manso@aluno.ufabc.edu.br

erik.conte@ufabc.edu.br

Cleiton Lazaro Fazolo de Assis

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

fazolocla@ifsp.edu.br

***Abstract.** in micro milling process, the quick wear and premature breakage of tools configure a problem that affects not only the process costs but also the manufacturing quality. This work investigates the effect of feed per tooth and cutting length in a dry machining of a tool steel H13 workpiece (X40CrMoV5-1). Spindle speed was kept constant (27200 rpm) as well the depth of cut (30 μm) and two feeds per tooth were applied (1.5 and 3.0 μm), and three cutting length (316, 632 and 948 mm). The wear of the tool top area was measured during micro milling tests with scanning electron microscope. The lower level of feed per tooth showed a higher tool wear. A linear regression model is proposed to predict the tool diameter reduction due tool wear. A balance between cutting parameters and cutting length must be considered to ensure micromachining without severe tool wear and preserve microchannel features along its machined surface.*

Keywords: micro milling, tool wear, cutting parameters

RESPONSIBILITY NOTICE

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